

VISIT...

LANZAROTE
Caliente.COM

ЭРЛ Д. ГЕЙТС

ВВЕДЕНИЕ В ЭЛЕКТРОНИКУ



СЕРИЯ «УЧЕБНИКИ И УЧЕБНЫЕ ПОСОБИЯ»

Эрл Д. Гейтс

**ВВЕДЕНИЕ
В ЭЛЕКТРОНИКУ**

ПРАКТИЧЕСКИЙ ПОДХОД

Издательство «ФЕНИКС»

Ростов-на-Дону

1998

ББК 22.3 Я 72

Г 29

Перевод Синдеева Ю.Г.

Эрл Д.Гейтс

Г 29 Введение в электронику. Серия «Учебники и учебные пособия». Ростов-на-Дону: «Феникс», 1998. — 640 с.

Книга известного американского специалиста в простой и доступной форме знакомит с основами современной электроники. Основная ее цель — теоретически подготовить будущих специалистов — электриков и электронщиков — к практической работе, поэтому кроме детального изложения принципов работы измерительных и полупроводниковых приборов, интегральных микросхем рассмотрены общие вопросы физики диэлектриков и полупроводников. Обсуждение общих принципов микроэлектроники, описание алгоритмов цифровой обработки информации сопровождается примерами практической реализации устройств цифровой обработки сигналов, описаны принципы действия и устройство компьютера. Книга снабжена большим количеством примеров, задач и упражнений, выполнение которых помогает пониманию и усвоению материала. Предназначена для учащихся старших курсов средних специальных учебных заведений радиотехнического профиля, а также будет полезна самостоятельно изучающим основы электроники.

ISBN 5-222-00417-1

ББК 22.3 Я 72

© 1997 by Delmar, A Division of International Thomson Publishing Inc.

ALL RIGHTS RESERVED. No part of this book may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying, recording, or any information storage and retrieval system, without permission, in writing, from the Publisher.

© Перевод: Синдеев Ю.Г., 1998

© Изд-во «Феникс», оформление, 1998

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Техника безопасности	8

РАЗДЕЛ 1.

Цепи постоянного тока.....	11
Глава 1. Основы электричества	14
Глава 2. Ток	26
Глава 3. Напряжение	36
Глава 4. Сопротивление	56
Глава 5. Закон Ома	80
Глава 6. Электрические измерения — измерительные приборы	96
Глава 7. Мощность	116
Глава 8. Цепи постоянного тока	123
Глава 9. Магнетизм	140
Глава 10. Индуктивность	163
Глава 11. Емкость	172

РАЗДЕЛ 2.

Цепи переменного тока	183
Глава 12. Переменный ток	186
Глава 13. Измерения переменного тока	199
Глава 14. Резистивные цепи переменного тока	214
Глава 15. Емкостные цепи переменного тока	224
Глава 16. Индуктивные цепи переменного тока	235
Глава 17. Резонансные цепи	244
Глава 18. Трансформаторы	257

РАЗДЕЛ 3.

Полупроводниковые приборы	271
Глава 19. Основы полупроводников	275
Глава 20. Диоды на основе р-п перехода	288
Глава 21. Стабилитроны	302
Глава 22. Биполярные транзисторы	311
Глава 23. Полевые транзисторы	325

Глава 24. Тиристоры	344
Глава 25. Интегральные микросхемы	359
Глава 26. Оптоэлектронные устройства	370

РАЗДЕЛ 4.

Линейные электрические цепи	383
Глава 27. Источники питания	386
Глава 28. Усилители	416
Глава 29. Генераторы	457
Глава 30. Цепи формирования сигнала	472

РАЗДЕЛ 5.

Цифровые электронные цепи	487
Глава 31. Двоичная система счисления	490
Глава 32. Основные логические элементы	501
Глава 33. Простые логические цепи	512
Глава 34. Последовательные логические цепи	518
Глава 35. Комбинационные логические схемы	538
Глава 36. Основы микрокомпьютеров	557

Словарь специальных терминов	571
---	------------

Приложения	589
-------------------------	------------

Ответы на вопросы самопроверки	600
---	------------

ПРЕДИСЛОВИЕ

Создание этой книги началось с написания обзора, который я завершил несколько лет назад. Тогда я рассмотрел около двадцати специальностей в электронной промышленности и попытался ответить на следующие вопросы:

1. Какой должна быть подготовка студентов, начинающих работать в области электроники после окончания учебного заведения?
2. Соответствуют ли цели и приоритеты используемых в настоящее время программ высшей школы по электронике изменениям в промышленности?

Исследование показало, что промышленности нужен выпускник по специальности «электроника», который сможет обнаружить неисправности, провести измерения с помощью различного тестирующего оборудования, особенно с помощью осциллографа, он должен уметь паять, знать, где найти информацию и ориентироваться в справочной литературе по электронике.

Я обнаружил также, что промышленность больше ценит в студентах способность *делать*, чем способность *знать*. Короче говоря, я пришел к выводу, что обучению теории надо посвящать времени меньше, а практике — больше.

Второе издание *Введения в электронику* продолжает давать студентам основные знания по электронике, в которых нуждается промышленность. Текст книги тщательно проработан с целью сделать процесс обучения более легким и эффективным. Курс рассчитан на один год и сосредоточен на привитии исследовательских навыков, а не на обучении мастерству. Предполагается в первом семестре изучать цепи постоянного и переменного тока, во втором — полупроводники и линейные цепи, в третьем — цифровые устройства.



Ниже приведены некоторые основные особенности изложения материала:

- Главы книги очень короткие и посвящены узким вопросам.
- В начале каждой главы указаны цели обучения.
- Для улучшения восприятия материала в книге широко используются иллюстрации.
- В каждой главе имеются обзорные вопросы для того, чтобы студент мог проверить себя.
- Математика в книге используется только для записи основных формул.
- Частые примеры показывают, как использовать математические формулы.
- В резюме после каждой главы перечислены наиболее важные вопросы.
- Каждую главу завершают вопросы для самопроверки.

При разработке книги было сделано все, чтобы она отвечала потребностям как студентов, так и преподавателей.

Структура книги такова, что материал в ней изложен в логической последовательности. Однако, поскольку каждая глава является самостоятельной единицей, последовательность изложения материала студентам может изменяться в зависимости от стиля преподавания.

Я пригласил преподавателя математики для проверки точности всех примеров и ответов на вопросы самопроверки. Все примеры в книге подготовлены с помощью этого преподавателя. Благодаря такому подходу созданы примеры, которые помогут студенту связать математику, изучаемую на уроках математики, с математикой, используемой в электронике.

Поскольку в лаборатории студенты применяют изученную в классе теорию на практике, я разработал руководство по лабораторным работам, которое удовлетворяет требованиям промышленности. Честолюбивые проекты подкрепляют процесс обучения студентов и помогают им увидеть, как теория становится практикой.



Настоящий учебник и руководство по лабораторным работам помогут студентам расширить их знания в области электроники. Я включил путеводитель по учебному плану в Путеводитель Инструктора, который служит основой для программ по электронике. Этот учебный план используется в нашем школьном округе несколько лет и успешно себя зарекомендовал. Кроме того, путеводитель по учебному плану был представлен в Департамент Образования штата Нью-Йорк и одобрен там как один из вариантов технологических программ.

Мне хотелось бы поблагодарить двух людей, чья помощь и поддержка сделала переработку этой книги возможной: учителя математики Черил Сколэнд и преподавателя электроники Ролфа Тидеманна из Греческой Центральной Школы. Мне хотелось бы также выразить свою признательность представителям промышленности, которые продолжали оказывать мне поддержку, когда я нуждался в ней: Джералду Бассу, президенту EIC Electronics и Томасу Фегаделу, владельцу Glenwood Sales. Благодарю также многочисленных преподавателей, которые использовали текст книги на своих уроках и обратили мое внимание на неточности, указав, какие вопросы надо исключить или расширить.

Мне хотелось бы также поблагодарить рецензентов за их значительную поддержку: Джеймса Роунера из Ланкастерской профессиональной школы; Гэри А. Смита из Гротонской центральной школы, Рональда Дж. Фронковяка из Центра Образования Орлеан/Ниагара, Хоя Дж. Дэвиса из Высшей школы графства Вебстер и Джоэла Шнейда из Высшей Школы Восточного Виндзора.

И, наконец, я хотел бы поблагодарить мою жену Ширли, моих дочерей Кимберли и Сьюзен и моего сына Тимоти, которые поддерживали меня при создании этого текста.

Эрл. Д. Гейтс

ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

Перечисленные ниже меры предосторожности не заменяют инструктаж, проводимый в классе или приведенный в руководстве по лабораторным работам. Если в какой-то момент у вас возникнет вопрос, что делать дальше, проконсультируйтесь с преподавателем.

ОБЩИЕ МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Ввиду возможности получения травмы, опасности пожара и повреждения оборудования и материалов, при любых работах, связанных с электрическими и электронными цепями, должны соблюдаться следующие меры безопасности:

1. *Выключите питание перед началом работы с цепью или оборудованием. Никогда не пренебрегайте безопасными соединительными устройствами. Никогда не предполагайте, что цепь выключена, проверьте это с помощью вольтметра.*
2. *Удаляйте и заменяйте предохранители только после отключения питания от цепи.*
3. *Убедитесь в том, что все оборудование правильно заземлено.*
4. *Проявляйте предельную осторожность при удалении или установке аккумуляторов, содержащих кислоту.*
5. *Используйте летучие очищающие жидкости только в хорошо проветриваемых помещениях.*
6. *Храните ветошь и другие легковоспламеняющиеся материалы в плотно закрытых металлических контейнерах.*
7. *В случае поражения электрическим током обесточьте цепь и немедленно доложите преподавателю.*

МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С ВЫСОКИМ НАПРЯЖЕНИЕМ

По мере приобретения опыта в работе с электрическими цепями, люди, как это свойственно человеческой при-



роде, становятся беспечными при выполнении рутинных операций. Многие части электрического оборудования используют опасные для жизни напряжения, которые могут оказаться смертельными при контакте с ними. При работе с высоковольтными цепями или вблизи них всегда следует соблюдать следующие меры предосторожности:

1. *Обдумайте последствия каждого вашего действия.* Нет абсолютно никаких причин считать, что вы не подвергнете опасности свою жизнь и жизни других.
2. *Держитесь подальше от включенных цепей.* Не работайте и не настраивайте цепи при включенном высоком напряжении.
3. *Не работайте в одиночку.* Всегда работайте в присутствии других лиц, способных оказать вам поддержку и первую помощь при несчастном случае.
4. *Не нарушайте соединений.*
5. *Не заземляйтесь.* Убедитесь в том, что вы не заземлены при проведении настроек или при использовании измерительных инструментов.
6. *Никогда не включайте оборудование при повышенной влажности.*

ЛИЧНЫЕ МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ

Уделите время принятию мер предосторожности при работе с электрическими и электронными цепями. Не работайте с любыми цепями или оборудованием до тех пор, пока не будут соблюдены все меры безопасности.

1. *Работайте только на чистых и сухих поверхностях.* Избегайте работы в захламленных или влажных местах, так как сопротивление кожи при этом будет более низким и может увеличить вероятность электрического поражения.
2. *Не надевайте свободную или распахнутую одежду.* Она может не только за что-то зацепиться, но и послужить проводником электричества.
3. *Используйте только непроводящую обувь.* Это уменьшит риск электрического поражения.



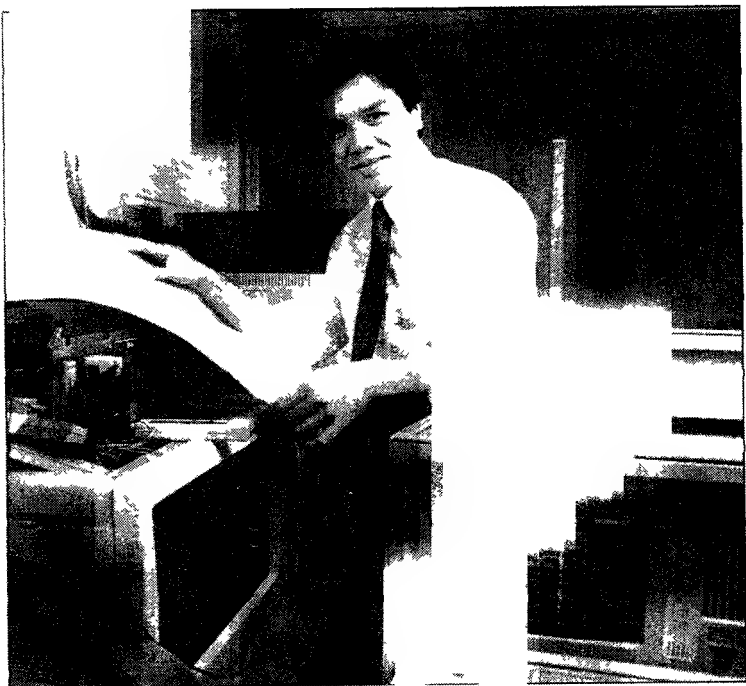
4. *Снимите все кольца, наручные часы, браслеты, цепочки и подобные металлические изделия. Не используйте одежду, содержащую металлические змейки, кнопки и другую металлическую фурнитуру. Металл, пропуская ток, может нагреваться и служить причиной ожогов.*
5. *Не удаляйте горячие предметы голыми руками.*
6. *Используйте закорачивающий электрод для удаления высоковольтных зарядов на конденсаторах. Конденсаторы могут оставаться заряженными длительное время, помните об этом.*
7. *Убедитесь в том, что используемое оборудование тщательно заземлено. Заземлите все тестирующее и/или тестируемое оборудование и цепи.*
8. *Отключите питание от цепи перед подключением к ней зажимов типа «крокодил». Использование неизолированных зажимов типа «крокодил» может служить причиной электрического поражения.*
9. *При измерении напряжений выше 300 вольт не держите руками тестирующие щупы. Это предотвратит возможность электрического поражения из-за ненадежности изоляции щупов.*

Безопасность — это ответственность каждого. Необходимо всем в классе и вне класса упражняться в мерах предосторожности для гарантии, что ни один ученик не получит травмы, а оборудование не будет повреждено.

В каждом классе, где вы будете работать, необходимо уделить особое внимание технике безопасности.

Раздел 1.

ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА



Специальность — инженер-электрик

Электротехника является весьма обширной отраслью технических наук. Инженер-электрик проектирует новые изделия, определяет их технические характеристики и требования по эксплуатации. Инженеры-электрики также испытывают оборудование и решают возникающие при этом проблемы. Они должны знать, сколько времени потребуется для осуществления того или иного проекта и уметь определить стоимость этого проекта.

Область деятельности, связанная с электричеством, требует специалистов двух типов: инженеров-электриков и инженеров-электронщиков. Инженер-электрик работает с оборудованием по производству и передаче электроэнергии, электродвигателями, занят управлением и контролем электрооборудования и установкой электропроводки и освещения. Инженер-электронщик имеет дело с электронным оборудованием: радарам, компьютерами, коммуникациями и бытовой техникой.

Ожидается, что потребность в инженерах к 2000 году, значительно возрастет. Этот предполагаемый рост связан с увеличением потребности в компьютерах, коммуникационном оборудовании и военной технике. Дополнительные рабочие места создаются благодаря исследованиям и разработкам новых типов автоматов и промышленных роботов.

Глава 1. ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Дать определения *атома, материи, элемента и молекулы*.
- Перечислить части атома.
- Дать определение *валентной оболочки* атома.
- Знать, в каких единицах измеряется ток.
- Изобразить символ, используемый для обозначения тока в цепи.
- Описать разницу между проводниками, изоляторами и полупроводниками.
- Дать определения *разности потенциалов, электродвижущей силы и напряжения*.
- Изобразить символ, используемый для обозначения напряжения.
- Знать, в каких единицах измеряется напряжение.
- Дать определение *сопротивления*.
- Знать характеристики сопротивления в цепи.
- Знать, в каких единицах измеряется сопротивление.
- Изобразить символ, используемый для обозначения сопротивления в цепи.

Любая вещь, созданная природой или человеком, может быть разбита на мельчайшие кусочки. Однако наименьшей частью вещества является атом.

Атом состоит из протонов, нейтронов и электронов. Протоны и нейтроны сгруппированы в центре атома и образуют ядро. Электроны расположены на оболочках на различных расстояниях от ядра.

Когда соответствующая внешняя сила воздействует на электроны, находящиеся на внешней оболочке, они отрываются от атома и становятся свободными. Движение сво-



бодных электронов называется током. Внешняя сила, необходимая для создания тока, называется напряжением. На своем пути ток встречает некоторое противодействие, называемое сопротивлением.

В этой главе рассмотрено, как связать между собой ток, напряжение и сопротивление — эти основополагающие понятия учения об электричестве.

1-1. МАТЕРИЯ, ЭЛЕМЕНТЫ И СОЕДИНЕНИЯ

Материей является все, что занимает окружающее нас пространство и имеет вес. Материя бывает в одном из трех основных состояний: твердом, жидком или газообразном. Примерами материи являются: воздух, которым мы дышим, вода, которую пьем, одежда, которую носим, и мы сами. *Материя* может быть либо элементом, либо соединением.

Элемент является основным строительным материалом природы. Он представляет собой субстанцию, которая не может быть разделена на более простые субстанции химическим путем. В настоящее время известно около 100

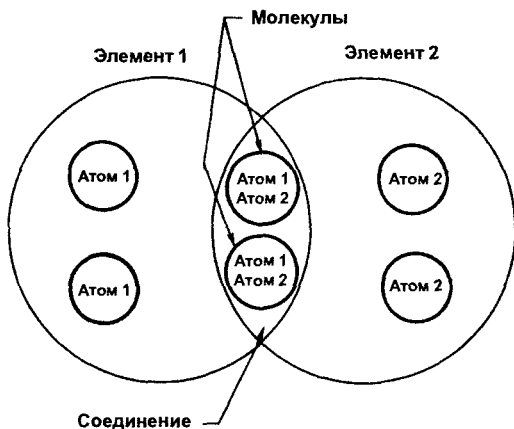


Рис. 1-1. Химическая комбинация двух или более элементов называется соединением. Молекула — это химическая комбинация двух или более атомов. Примерами являются вода (H_2O) и соль ($NaCl$).



элементов. Примерами элементов являются золото, серебро, медь и кислород.

Химическая комбинация двух или более элементов называется **соединением** (рис. 1-1). *Соединение* может быть разделено химическим, но не механическим способом. Примерами соединений являются вода, которая состоит из кислорода и водорода, и поваренная соль, состоящая из натрия и хлора. Наименьшая частица соединения, которая еще сохраняет его свойства, называется **молекулой**. *Молекула* — это химическая комбинация двух или более атомов. **Атом** — это наименьшая частица элемента, сохраняющая характеристики элемента.

Комбинация элементов и соединений, не вступивших в химическую реакцию, называется **смесью**. Примерами *смесей* являются воздух, состоящий из кислорода, азота, углекислого газа и других газов, и соленая вода, которая состоит из соли и воды.

1-1. Вопросы

1. В каких состояниях бывает материя?
2. Как называется субстанция, которая не может быть разделена на более простые субстанции химическим путем?
3. Что является наименьшей частицей соединения, которая сохраняет его характеристики?
4. Что является наименьшей частицей, которая сохраняет характеристики элемента?

1-2. ЗНАКОМСТВО С АТОМАМИ

Атом является наименьшей частицей *элемента*, сохраняющей его характеристики. Атомы различных элементов отличаются друг от друга. Поскольку существует свыше 100 различных элементов, то существует и свыше 100 различных видов атомов.

Каждый атом имеет **ядро**. **Ядро** расположено в центре атома. Оно содержит положительно заряженные частицы — **протоны** и незаряженные частицы — **нейтроны**. Отри-



цательно заряженные частицы — электроны вращаются вокруг ядер (рис. 1-2).

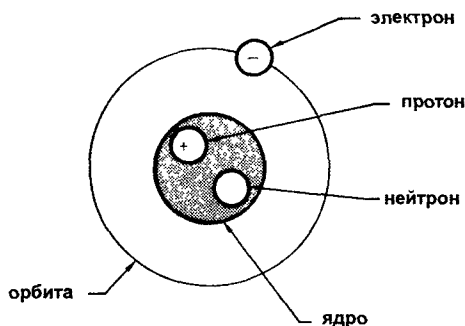


Рис. 1-2. Части атома.

Количество *протонов* в ядре атома называется **атомным номером** элемента. Атомные номера позволяют отличить один элемент от другого.

Каждый элемент имеет атомный вес. **Атомный вес** — это масса атома, которая определяется общим числом протонов и нейтронов в ядре. Электроны практически не дают вклада в общую массу атома, масса электрона составляет только $1/1845$ часть массы протона и ею можно пренебречь.

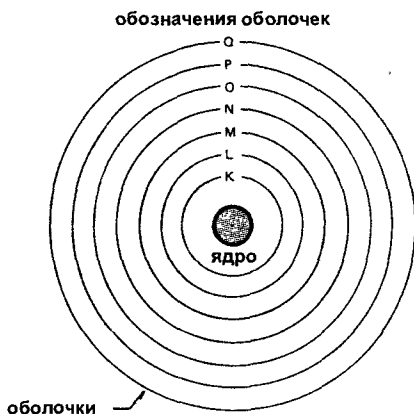


Рис. 1-3. Электроны расположены на оболочках вокруг ядра.

Электроны вращаются по концентрическим орбитам вокруг ядра. Каждая орбита называется **оболочкой**. Эти *оболочки* заполняются в следующей последовательности: сначала заполняется оболочка К, затем L, M, N и т.д. (рис. 1-3). Максимальное количество электронов, которое может разместиться на каждой оболочке показано на рис. 1-4.



Обозначения оболочек	Общее количество электронов
K	2
L	8
M	18
N	32
O	18
P	12
Q	2

Рис. 1-4. Количество электронов, которое может принять каждая оболочка.

Материал	Проводимость
Серебро	Высокая ↓ Низкая
Медь	
Золото	
Алюминий	
Вольфрам	
Железо	
Нихром	

Рис. 1-5. Проводимость различных металлов, используемых в качестве проводников.

Внешняя оболочка называется **валентной**, и количество электронов, содержащееся в ней, называется **валентностью**. Чем дальше от ядра *валентная оболочка*, тем меньшее притяжение со стороны ядра испытывает каждый валентный электрон. Таким образом, потенциальная возможность атома присоединять или терять электроны увеличивается, если валентная оболочка не заполнена и расположена достаточно далеко от ядра.

Электроны валентной оболочки могут получать энергию. Если эти электроны получают достаточно энергии от внешних сил, они могут покинуть атом и стать свободными электронами, произвольно перемещающимися от атома к атому. Материалы, содержащие большое количество свободных электронов называются **проводниками**. На рис. 1-5 сравниваются проводимости различных металлов, используемых в качестве *проводников*. В таблице серебро, медь и золото имеют валентность равную единице (рис. 1-6). Однако серебро является лучшим проводником, поскольку его валентные электроны слабее связаны.

Изоляторы, в противоположность проводникам, препятствуют протеканию электричества. *Изоляторы* стабильны

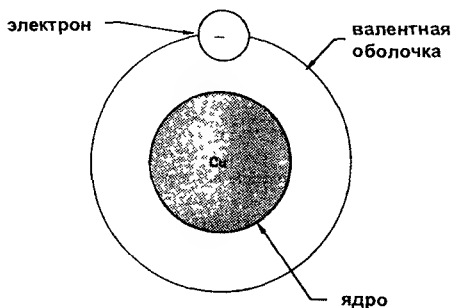


Рис. 1-6. Валентность меди равна 1.

благодаря тому, что валентные электроны одних атомов присоединяются к другим атомам, заполняя их валентные оболочки, препятствуя, таким образом, образованию свободных электронов. Материалы, классифицируемые как изоляторы, сравниваются на рис. 1-7. Слюда является наилучшим изолятором, потому что она имеет наименьшее число свободных электронов на своих валентных оболочках.

Промежуточное положение между проводниками и изоляторами занимают **полупроводники**. *Полупроводники* не являются ни хорошими проводниками, ни хорошими изоляторами,

Материал	Диэлектрические свойства
Слюда	Высокие
Стекло	
Фторопласт	
Бумага (парафинированная)	
Резина	
Бакелит	
Масла	
Фарфор	
Воздух	

потому что их проводимость можно изменять от проводника до изолятора. Кремний и германий являются полупроводниковыми материалами.

Об атоме, который имеет одинаковое число электронов и протонов, говорят, что он электрически нейтрален. Атом, получающий один или более электронов, не является электрически нейтральным. Он становится от-

Рис. 1-7. Диэлектрические свойства различных материалов, используемых в качестве изоляторов.



рицательно заряженным и называется **отрицательным ионом**. Если атом теряет один или более электронов, то он становится положительно заряженным и называется **положительным ионом**. Процесс присоединения или потери электронов называется **ионизацией**. *Ионизация* играет большую роль в протекании электрического тока.

1-2. Вопросы

1. Какая атомная частица имеет положительный заряд и большую массу?
2. Какая атомная частица не имеет заряда вообще?
3. Какая атомная частица имеет отрицательный заряд и маленькую массу?
4. Что определяется количеством электронов на самой внешней оболочке атома?
5. Каким термином описывается присоединение и потеря электронов атомом?

1-3. ТОК

При наличии внешней силы движение электронов направлено от отрицательно заряженных атомов к положительно заряженным. Этот поток электронов называется **током** (I). *Ток* измеряется суммой зарядов всех электронов, прошедших через заданную точку.

Электрон имеет очень маленький заряд, такой, что заряд 6 280 000 000 000 000 000 электронов, собранных вместе, называется **кулоном** (Кл). Когда заряд в один *кулон* проходит через заданную точку за одну секунду, это означает, что по проводнику течет ток в один **ампер** (А). Единица силы тока названа в честь французского физика Андре Мари Ампера (1775–1836). Сила тока измеряется в амперах.

1-3. Вопросы

1. Какое действие приводит к появлению тока в электрической цепи?



2. Какое действие приводит к появлению тока в один ампер?
3. Какой символ используется для обозначения силы тока?
4. Какой символ используется для обозначения единицы силы тока?

1-4. НАПРЯЖЕНИЕ

Если имеет место избыток электронов (отрицательный заряд) на одном конце проводника и дефицит электронов (положительный заряд) на другом конце проводника, то по проводнику течет ток. Ток будет течь до тех пор, пока эти условия выполняются. Источник, который создает избыток электронов на одном конце проводника и дефицит электронов на другом конце, характеризуется **потенциалом**. *Потенциал* — это способность источника выполнять электрическую работу.



1-8. Поток электронов в цепи, обусловленный разностью потенциалов.

Реальная работа, производимая в цепи, является результатом наличия **разности потенциалов** на двух концах проводника. Именно эта *разность потенциалов* заставляет электроны двигаться или течь в цепи (рис. 1-8). Разность потенциалов связана с **электродвижущей силой** (э.д.с.) или **напряжением**. *Напряжение* — это сила, которая перемещает электроны в цепи. Напряжение можно представить как давление или насос, перемещающий электроны.



Символ E используется в электронике для обозначения напряжения. Единицей измерения напряжения является **вольт (В)**, названный в честь графа Алессандро Вольты (1745–1827), изобретателя первого элемента, вырабатывающего электричество. Один вольт — это потенциал, приложенный к проводнику сопротивлением в один ом, для получения тока в один ампер.

1-4. Вопросы

1. Как называется устройство, которое создает напряжение?
2. Каким термином обозначается потенциал между двумя концами проводника?
3. Какой символ используется для обозначения напряжения?
4. Какой символ используется для обозначения единицы напряжения?

1-5. СОПРОТИВЛЕНИЕ

Когда свободные электроны перемещаются по цепи, они встречают на своем пути атомы, которые не очень охотно уступают им дорогу. Это противодействие потоку электронов (току) называется **сопротивлением (R)**.

Каждый материал обладает некоторым сопротивлением или противодействием току. Степень сопротивления материала зависит от его размера, формы и температуры.

Материалы с низким сопротивлением называются **проводниками**. *Проводники* содержат много свободных электронов и оказывают малое сопротивление току. Как упоминалось раньше, серебро, медь, золото и алюминий являются примерами хороших проводников.

Материалы с высоким сопротивлением называются **изоляторами**. *Изоляторы* содержат немного свободных электронов и оказывают высокое сопротивление току. Как упоминалось ранее, стекло, резина и пластмасса являются примерами хороших изоляторов.



Сопротивление измеряется в **омах** (Ом), эта единица названа в честь немецкого физика Георга Симона Ома (1787–1854). Один *ом* — это такое сопротивление, которое позволяет течь току в один ампер при приложенном напряжении в один вольт. Символом, обозначающим ом, является греческая буква омега (Ω).

1-5. Вопросы

1. Какой термин используется для обозначения противодействия току?
2. Какое основное отличие между проводниками и изоляторами?
3. Какой символ используется для обозначения сопротивления?
4. Какой символ используется для обозначения единицы сопротивления?

РЕЗЮМЕ

- Материей является все, что заполняет окружающее нас пространство.
- Материя может быть элементом или соединением.
- Элемент является основным строительным материалом природы.
- Соединение — это комбинация двух или более элементов.
- Молекула — это наименьшая частица соединения, которая сохраняет его свойства.
- Атом — это наименьшая частица материи, которая сохраняет структуру элемента.
- Атом состоит из ядра, содержащего протоны и нейтроны. Он также содержит электроны, находящиеся на орбитах вокруг ядра.
- Протоны имеют положительный заряд, электроны имеют отрицательный заряд, а нейтроны не имеют заряда.
- Атомный номер элемента — это число протонов в ядре.



- Атомная масса элемента является суммой масс протонов и нейтронов.
- Орбиты, по которым движутся электроны, называются оболочками.
- Внешняя оболочка атома называется валентной оболочкой.
- Число электронов на валентной оболочке называется валентностью.
- Атом, который имеет одинаковое число протонов и электронов, называется электрически нейтральным.
- Процесс, при котором атом присоединяет или теряет электроны, называется ионизацией.
- Поток электронов называется током.
- Ток обозначается символом I .
- Заряд $6\,280\,000\,000\,000\,000\,000$ электронов называется кулон.
- Ток в один ампер означает, что через данную точку за одну секунду проходит один кулон заряда.
- Ампер обозначается символом A .
- Ток измеряется в амперах.
- Электрический ток течет через проводник при наличии избытка электронов на одном конце проводника и дефицита на другом конце.
- Источник, обеспечивающий избыток электронов, характеризуется потенциалом или электродвижущей силой.
- Потенциал или электродвижущая сила связаны с напряжением.
- Напряжение — это сила, перемещающая электроны в цепи.
- Для обозначения напряжения используется символ E .
- Единицей измерения напряжения является вольт (V).
- Сопротивление — это противодействие току.
- Сопротивление обозначается символом R .
- Все материалы оказывают некоторое сопротивление току.
- Сопротивление материала зависит от размеров материала, его формы и температуры.



- Проводники — это материалы с низким сопротивлением.
- Изоляторы — это материалы с высоким сопротивлением.
- Сопротивление измеряется в омах (Ом).
- Для обозначения омов используется греческая буква омега (Ω).

Глава 1. САМОПРОВЕРКА

1. Каким критериям должен удовлетворять атом хорошего проводника?
2. Что определяет принадлежность материала к проводникам, полупроводникам или изоляторам.
3. Почему важно понимание связи между проводниками, полупроводниками и изоляторами?
4. Объясните разницу между током, напряжением и сопротивлением.
5. Опишите, как определяется сопротивление материала.

Глава 2. ТОК

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Сформулировать два закона электростатических зарядов.
- Дать определение *кулона*.
- Дать определение единицы, используемой для измерения тока.
- Записать формулу, связывающую амперы, кулоны и время.
- Описать, как протекает ток в цепи.
- Описать, как электроны перемещаются по проводнику.
- Определять и использовать *научные обозначения*.
- Знать обычно используемые префиксы для степеней десяти.

Атом был определен как наименьшая частица элемента. Он состоит из электронов, протонов и нейтронов.

Электроны отрываются от атомов и перемещаются по проводнику, образуя электрический ток.

В этой главе рассматривается, как электроны отрываются от атомов для образования электрического тока, и вводится краткая математическая запись, позволяющая работать с очень малыми и очень большими числами.

2-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЗАРЯД

Два электрона вместе или два протона вместе представляют собой одноименные заряды. Подобные заряды сопротивляются сближению и стремятся удалиться друг от друга. Процесс называется *отталкиванием*. Первый закон взаимодействия электростатических зарядов гласит: одноименные заряды отталкиваются друг от друга (рис. 2-1). Согласно второму закону взаимодействия электростатических зарядов, разноименные заряды притягиваются друг к другу.

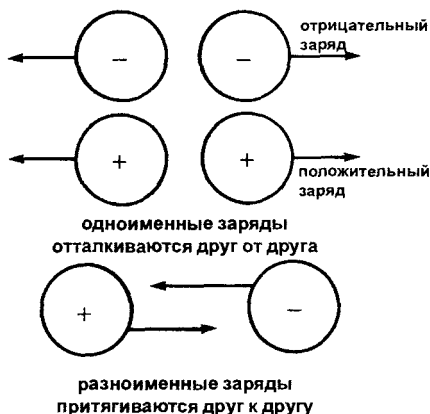


Рис. 2-1. Основные законы взаимодействия электростатических зарядов.

Отрицательные электроны притягиваются к положительным протонам в ядре атома. Эта сила притяжения уравновешивается центробежной силой, обусловленной вращением электронов вокруг ядра. В результате электрон остается на орбите и не падает на ядро.

Величина сил притяжения и отталкивания, действующих между

двумя электрически заряженными телами, зависит от двух факторов: их зарядов и расстояния между ними.

Отдельный электрон имеет заряд, который слишком мал для практического использования. Для измерения заряда принята единица, называемая **кулоном** (Кл), которая названа в честь Шарля Кулона. Электрический заряд (Q) 6 280 000 000 000 000 000 электронов (шесть квинтиллионов 280 квадриллионов или $6,28 \times 10^{18}$) составляет один *кулон*.

$$1 \text{ Кл} = 6,28 \times 10^{18} \text{ электронов}$$

Электрические заряды создаются смещением электронов. Когда имеет место избыток электронов в одной точке и дефицит электронов в другой точке, между этими точками существует разность потенциалов. Когда существует разность потенциалов между двумя заряженными телами, соединенными проводником, электроны будут течь по проводнику. Этот поток электронов называется **током**.

2-1. Вопросы

1. О чем говорят два закона взаимодействия электрических зарядов?



2. Как обозначается электрический заряд?
3. Дайте определение *кулона*.

2-2. ПРОТЕКАНИЕ ТОКА

Электрический **ток** представляет собой медленный дрейф электронов из области отрицательного заряда в область положительного заряда. Для измерения силы тока используется **ампер** (А). Эта единица названа в честь французского физика Андре Мари Ампера (1775–1836). Ампер представляет силу тока в проводнике, когда заряд в один кулон перемещается через заданную точку за одну секунду. Соотношение между ампером и кулоном за секунду выражается формулой:

$$I = \frac{Q}{t},$$

где I — сила тока в амперах, Q — величина электрического заряда в кулонах, t — время в секундах.

ПРИМЕР. Чему равна сила тока в амперах, если через точку в электрической цепи прошло 9 кулон заряда за 3 секунды?

Дано:

$$I = ?$$

$$Q = 9 \text{ Кл}$$

$$t = 3 \text{ с}$$

Решение:

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$I = \frac{9}{3}$$

$$I = 3 \text{ А}$$

ПРИМЕР. По цепи течет ток 5 ампер. Сколько времени займет прохождение 1 кулона заряда через данную точку цепи?

Дано:

$$I = 5 \text{ А}$$

$$Q = 1 \text{ К}$$

$$t = ?$$

Решение:

$$I = \frac{Q}{t}$$

$$5 = \frac{1}{t}$$



$$\frac{1}{5} = t$$

$$0,2 \text{ секунды} = t$$

Отрицательно заряженные электроны, как правило, являются носителями заряда в электрической цепи. Следовательно, электрический ток — это поток отрицательных зарядов. Принято считать, что направление тока противоположно направлению потока электронов. Позднее было установлено, что при перемещении электрона от одного атома к другому создаются положительные заряды, называемые **дырками**, которые перемещаются в противоположном направлении (рис. 2-2, 2-3). Электроны и ток при этом остаются такими же.

Если электроны добавляются на одном конце проводника и берутся для этого с другого конца, то по проводнику течет ток. По мере своего медленного перемещения по проводнику свободные электроны сталкиваются с атомами, освобождая при этом другие электроны. Эти новые свободные электроны перемещаются по направлению к положительно заряженному концу проводника и сталкиваются с другими атомами. Дрейф электронов от отрицательно заряженного конца проводника к положительному происходит вследствие отталкивания зарядов. Кроме того, положительно

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ

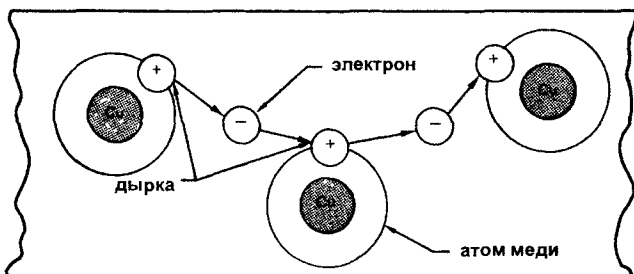


Рис. 2-2. Когда электроны перемещаются от одного атома к другому, они вызывают появление противоположно движущихся положительных зарядов, называемых *дырками*.

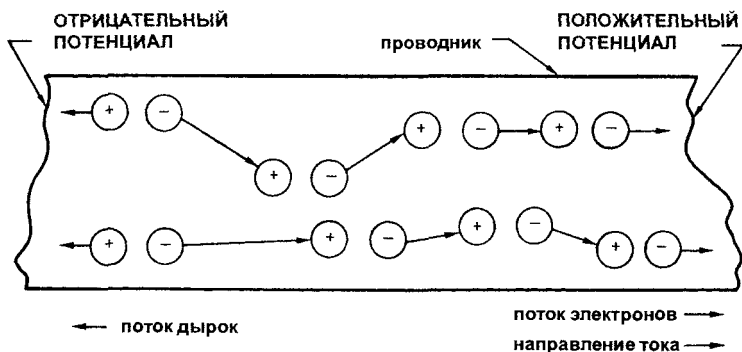


Рис. 2-3. Направление движения электронов противоположно направлению движения дырок.

заряженный конец проводника с дефицитом электронов притягивает электроны как противоположные по знаку заряды.

Дрейф электронов происходит медленно (примерно три миллиметра в секунду), но отдельные электроны, сталкиваясь с атомами, освобождают электроны, движущиеся почти со скоростью света ($2,99 \times 10^8$ метров). Представим себе длинную трубу, заполненную шариками для пинг-понга (рис. 2-4). При добавлении шарика к одному концу трубы,

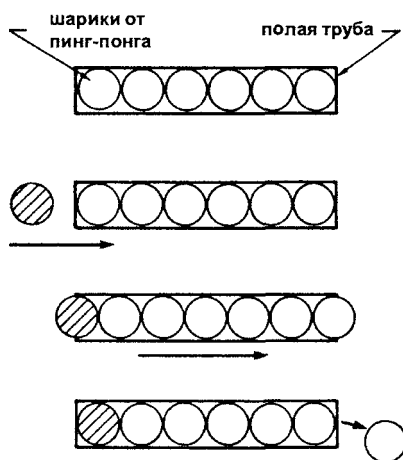


Рис. 2-4. Электроны в проводнике взаимодействуют подобно шарикам от пинг-понга в трубе.



из другого конца трубы шарик выталкивается. Хотя отдельные шарики тратят некоторое время на перемещение по трубе, частота их столкновений может быть очень высокой.

Устройство, которое удаляет электроны с одного конца проводника (положительного) и добавляет их к другому концу проводника (отрицательному), называется источником тока. Он может рассматриваться как своеобразный насос (рис. 2-5).

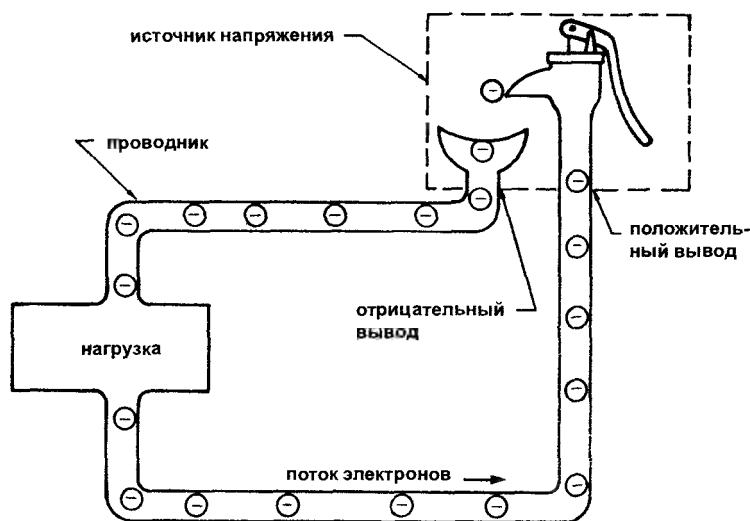


Рис. 2-5. Источник напряжения может рассматриваться как насос, снабжающий нагрузку электронами и поддерживающий избыток электронов.

2-2. Вопросы

1. Дайте определение *электрического тока*.
2. В каких единицах измеряется сила тока?
3. Каково соотношение между силой тока, зарядом и временем?
4. Какова сила тока, если через данную точку цепи за 5 секунд проходит 15 кулон заряда?



5. Сколько времени займет перемещение 3 кулонов заряда через данную точку цепи, если по цепи течет ток 3 ампера?
6. Что заставляет электроны двигаться по проводнику только в одном направлении?

2-3. СТЕПЕННОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЧИСЕЛ

В электронике обычно встречаются очень малые и очень большие числа. **Степенное представление** — это метод, использующий одноразрядные числа и степени десяти для отображения больших и малых чисел. Например, 300 в степенном представлении имеет вид 3×10^2 . Показатель степени показывает количество нулей справа или слева от десятичной запятой в числе. Например:

$$3 \times 10^3 = 3,0 \times 10^3 = \underbrace{3,000}_{\text{на 3 знака}} = 3000$$

Если степень отрицательная, десятичная запятая перемещается влево. Например:

$$3 \times 10^{-6} = 3,0 \times 10^{-6} = \underbrace{0,000003}_{\text{на 6 знаков}} = 0,000003$$

На рисунке 2-6 перечислены некоторые часто используемые степени десяти как положительные, так и отрицательные, а также префиксы и символы, связанные с ними. Например, ампер (А) — это большая единица силы тока,

Префикс	Символ	Значение	Значение в десятичной дроби
Гига-	G	10^9	1 000 000 000
Мега-	M	10^6	1 000 000
Кило-	k	10^3	1 000
Милли-	m	10^{-3}	0,001
Микро-	μ	10^{-6}	0,000001
Нано-	n	10^{-9}	0,000000001
Пико-	p	10^{-12}	0,000000000001

Рис. 2-6. Используемые в электронике префиксы.



не часто встречающаяся в маломощных электронных цепях. Наиболее часто используемыми единицами являются **миллиампер (мА)** и **микроампер (мкА)**. Миллиампер равен одной тысячной ($1/1000$) ампера или $0,001$ А. Другими словами, 1000 миллиампер равны одному амперу. Микроампер равен одной миллионной ($1/1\,000\,000$) ампера или $0,000001$ А; $1\,000\,000$ микроампер равны одному амперу.

ПРИМЕР. Сколько миллиампер содержится в 2 амперах?

$$\text{Решение: } \frac{1000 \text{ мА}}{1 \text{ А}} = \frac{X \text{ мА}}{2 \text{ А}} \quad (1000 \text{ мА} = 1 \text{ А})$$

$$(1)(X) = (1000)(2)$$

$$X = 2000 \text{ мА}$$

ПРИМЕР. Сколько ампер содержится в 50 микроамперах?

$$\text{Решение: } \frac{1\,000\,000 \text{ мкА}}{1 \text{ А}} = \frac{50 \text{ мкА}}{X \text{ А}}$$

$$(1)(50) = (1000000)(X)$$

$$\frac{50}{1000000} = X$$

$$0,00005 \text{ А} = X$$

2-3. Вопросы

1. Дайте определение *степенному представлению*.
2. В степенном представлении:
 - а. Что означает положительный показатель степени?
 - б. Что означает отрицательный показатель степени?
3. Запишите следующие числа в степенном представлении:
 - а. 500
 - б. 3768
 - в. 0,0056
 - г. 0,105
 - д. 356,78



4. Дайте определения следующим префиксам:

а. Милли-

б. Микро-

5. Выполните следующие преобразования:

а. $1,5\text{A} = \underline{\hspace{2cm}} \text{мА}$

б. $1,5\text{A} = \underline{\hspace{2cm}} \text{мкА}$

в. $150\text{мА} = \underline{\hspace{2cm}} \text{А}$

г. $750\text{мкА} = \underline{\hspace{2cm}} \text{А}$

РЕЗЮМЕ

- Законы взаимодействия электростатических зарядов: одноименные заряды отталкиваются, а разноименные — притягиваются.
- Электрический заряд (Q) измеряется в кулонах (Кл).
- Один кулон равен заряду $6,24 \times 10^{18}$ электронов.
- Электрический ток — это медленный дрейф электронов из области отрицательного заряда в область положительного заряда.
- Сила тока измеряется в амперах.
- Один ампер (А) — это ток, протекающий в проводнике, когда через заданную точку проходит заряд в один кулон за одну секунду.
- Соотношение между силой тока, зарядом и временем описывается формулой:

$$I = \frac{Q}{t}.$$

- Носителями заряда при наличии электрического тока в металлах являются электроны (отрицательные заряды).
- Перемещение дырок (положительных зарядов) направлено противоположно движению электронов.
- Ток электронов течет в цепи от отрицательного полюса к положительному.
- Электроны перемещаются по проводнику очень медленно, но отдельные электроны могут двигаться со скоростью, близкой к скорости света.



- С помощью степенного представления выражаются очень большие и очень маленькие числа.
- Если показатель степени десяти положительный, десятичная запятая перемещается вправо.
- Если показатель степени десяти отрицательный, десятичная запятая перемещается влево.
- Префикс *милли* обозначает одну тысячную.
- Префикс *микро* обозначает одну миллионную.

Глава 2. САМОПРОВЕРКА

1. Какова сила тока в цепи, если за 5 секунд через заданную точку протекает 7 кулон?
2. Опишите, как направлен поток электронов в цепи по отношению к распределению потенциала в цепи.
3. Запишите следующие числа с помощью степенного представления:
 - а. 235;
 - б. 0,002376;
 - в. 56323,786.
4. Что обозначают следующие префиксы?
 - а. Милли-
 - б. Микро-

Глава 3. НАПРЯЖЕНИЕ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить шесть основных источников напряжения.
- Описать шесть различных методов получения электричества.
- Дать определение элемента и батареи.
- Описать различие между первичными и вторичными элементами.
- Описать, на какие типы подразделяются элементы и батареи.
- Перечислить способы соединения элементов или батарей для увеличения выходного тока или напряжения, или и того, и другого.
- Дать определения *приложенного напряжения* и *падения напряжения*.
- Описать два типа заземления электрических цепей.

В кусочке медной проволоки имеет место хаотичное движение электронов. Для появления электрического тока электроны должны двигаться в определенном направлении. Для того, чтобы заставить электроны в медной проволоке двигаться в заданном направлении, им должна быть сообщена энергия. Энергию сообщает источник, соединенный с проволокой.

Сила, которая заставляет электроны двигаться в заданном направлении, определяется *разностью потенциалов* или *напряжением*.

3-1. ИСТОЧНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение возникает при удалении электронов со своих орбит в атомах. Таким образом, любой вид энергии, отрывающий электроны от атомов, может быть использован



для получения напряжения. Но надо помнить, что энергия никогда сама по себе не возникает. Имеет место просто переход энергии из одной формы в другую. Источник напряжения — это не просто источник электрической энергии. Скорее это способ преобразования других видов энергии в электрическую. Существует шесть основных источников напряжения — трение, магнетизм, химические реакции, свет, тепло и давление.

Трение является самым старым способом получения электричества. Стеклянная палочка зарядится, если ее потереть куском меха или шелка. **Генератор Ван де Граафа** — устройство, работающее на том же принципе, что и стеклянная палочка, и способное создавать напряжение в миллионы вольт (рис. 3-1). Однако кроме научных исследований, он нигде практически не используется.

В настоящее время основным методом получения электрической энергии является магнетизм. Если проводник

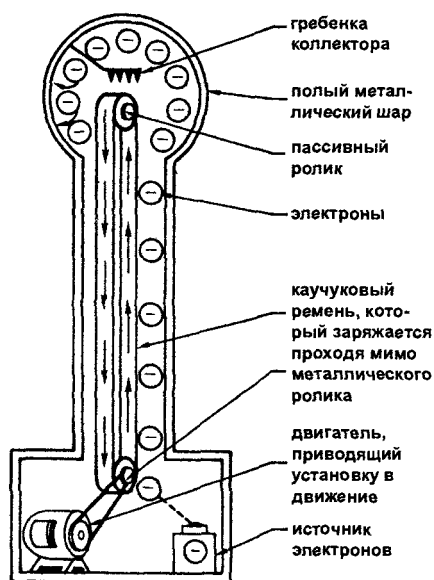


Рис. 3-1. Генератор Ван-де-Граафа способен создавать разность потенциалов в миллионы вольт.

перемещается в магнитном поле, на его концах возникает разность потенциалов, существующая в течение всего времени перемещения относительно магнитного поля. Устройство, основанное на этом принципе, называется генератором (рис. 3-2). Генератор может вырабатывать как постоянный, так и переменный ток. Когда электроны текут только в одном направлении, ток называется **постоянным**. Когда направление движения электронов периодически изменяется на



противоположное, ток называется **переменным**. Генератор может приводиться в движение нагретым паром, водой, ветром или бензиновыми и дизельными двигателями. Схематическое обозначение генератора переменного тока показано на рис. 3-3.

Вторым основным методом получения электричества в настоящее время является использование химических *батарей*. Электроды батареи состоят из двух разнородных металлов, например меди и цинка, погруженных в раствор соли, кислоты или щелочи. Электроды обеспечивают контакт между электролитом (раствором соли, кислоты или щелочи) и цепью. Электролит извлекает свободные электроны из медного электрода, оставляя его положительно заряженным. Цинковый электрод притягивает свободные электроны в электролите и таким образом приобретает отрицательный заряд. Несколько таких элементов могут быть соединены вместе и образовать батарею. На рис. 3-4 показаны схематические обозначения элемента и батареи. В настоящее вре-

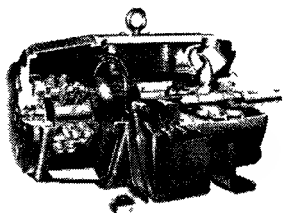


Рис. 3-2. Генератор использует магнетизм для получения электричества.



Рис. 3-3. Схематическое обозначение генератора переменного тока.

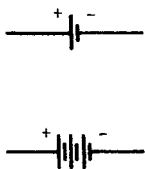


Рис. 3-4. Схематические обозначения элемента и батареи. Комбинация двух или более элементов образует батарею.

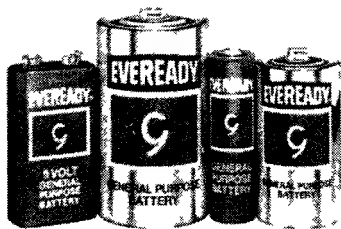


Рис. 3-5. Некоторые из широко используемых в настоящее время химических элементов и батарей.

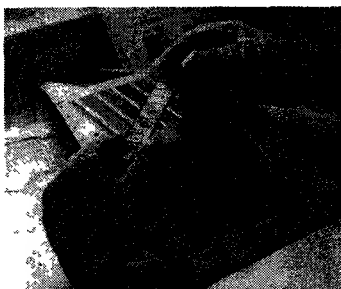


Рис. 3-6. Фотовольтаическая ячейка может преобразовывать солнечный свет прямо в электричество.



Рис. 3-7. Схематическое обозначение фотовольтаической ячейки (солнечного элемента).

мя используется много различных типов элементов и батарей (рис. 3-5).

Световая энергия может быть преобразована в электрическую энергию при попадании света на фоточувствительную пленку в **фотовольтаической ячейке** (солнечном элементе) (рис. 3-6). Солнечные элементы состоят из фоточувствительных материалов, расположенных между металлическими электродами. Когда поверхность фоточувствительного материала освещается светом, происходит выбивание электронов с орбит атомов, расположенных на поверхности материала. Это происходит за счет энергии света. Каждая отдельная ячейка вырабатывает небольшое напряжение. На рис. 3-7 показано схематическое обозначение солнечного элемента. Для получения пригодных к использованию напряжений и токов необходимо объединить вместе много солнечных элементов. Солнечные элементы используются главным образом на спутниках и в фотоаппаратах. Высокая стоимость ограничивает их широкое применение.

Тепло может быть преобразовано прямо в электричество с помощью устройства, называемого **термопарой** (рис. 3-8). Схематичное обозначение термопары показано на рис. 3-9. Термопара состоит из двух разнородных металлических проволок, скрученных вместе. Одна проволока медная, а другая из цинка или железа. При нагревании

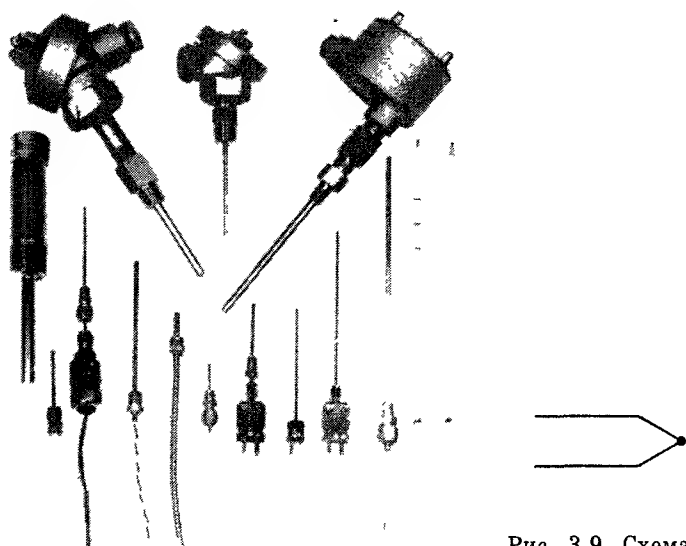


Рис. 3-8. Термопары преобразуют тепловую энергию непосредственно в электрическую.

Рис. 3-9. Схематическое обозначение термопары.

медная проволока легко отдает свободные электроны, которые передаются другому проводнику. Таким образом, медная проволока приобретает положительный заряд, а другая проволока — отрицательный, и появляется небольшая разность потенциалов или напряжение. Это напряжение прямо пропорционально количеству подведенного тепла. Одним из применений термопары является термометр, а также пирометр — устройство, которое часто используется для измерения высоких температур в печах и литейном производстве.

При приложении к некоторым кристаллическим материалам, таким как кварц, турмалин, сегнетова соль или титанат бария давления, возникает небольшое напряжение. Это явление называется **пьезоэлектрический эффект**. Сначала отрицательные и положительные заряды хаотично распределены в образце кристаллического материала и суммарный заряд не может быть обнаружен. При приложении давления, электроны покидают одну сторону мате-



Рис. 3-10. Кристаллический микрофон.



Рис. 3-11. Схематическое обозначение пьезоэлектрического кристалла.

риала и скапливаются на другой. Заряд возникает только при приложенном давлении. Когда давление убирают, заряд опять распределяется равномерно по объему материала. Возникающее напряжение мало и его необходимо усилить для того, чтобы использовать. Пьезоэлектрический эффект используется в кристаллических микрофонах, в головках звукозаписывающих пластинок и в кварцевых генераторах (рис. 3-10, 3-11).

Заметим, что при получении напряжения такими способами справедливо также и обратное: напряжение может использоваться для получения

магнитного поля, стимулирования химических реакций, выработки света, тепла и создания давления. Получение магнитного поля происходит в электромоторах, громкоговорителях, соленоидах и реле. Химические реакции происходят при электролизе и гальваническом нанесении покрытий. Свет испускается электролампочками и другими оптоэлектронными устройствами. Тепло производится нагревательными элементами в печах, утюгах и паяльниках. Приложенное напряжение может заставить кристалл деформироваться или совершать колебания.

3-1. Вопросы

1. Перечислите шесть основных источников напряжения.
2. Какой способ получения напряжения является основным?
3. Какой способ получения напряжения является вторым основным?



4. Почему солнечные элементы не используются широко для получения напряжения?

3-2. ЭЛЕМЕНТЫ И БАТАРЕИ

Как говорилось в предыдущем параграфе, элемент содержит положительный и отрицательный электроды, разделенные раствором электролита. **Батарея** — это комбинация двух или более элементов. Существует два основных типа элементов. Элементы, которые не могут быть перезаряжены, называются **первичными элементами**. Элементы, которые могут перезаряжаться, называются **вторичными элементами**.

Примером первичного элемента является сухой элемент (рис. 3-12). Элемент этого типа не является в действительности сухим. В качестве электролита он содержит влажную пасту. Уплотнитель предотвращает вытекание пасты при наклоне и переворачивании элемента. Электролитом сухого элемента является раствор хлорида аммония и двуокиси марганца. Электролит растворяет цинковый электрод (корпус элемента), оставляя в цинке избыток электро-

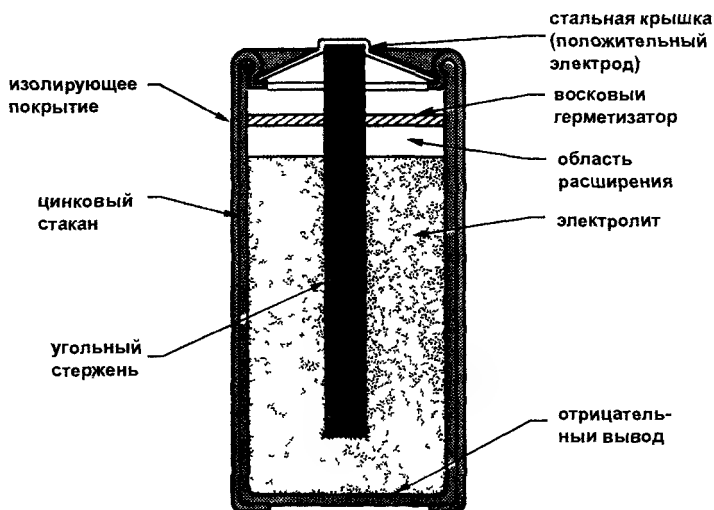


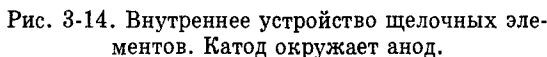
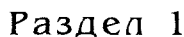
Рис 3 12 Внутреннее устройство сухого элемента



Рис 3-13 Примеры широко используемых сухих элементов

нов. По мере протекания тока через элемент, цинк, хлористый аммоний и двуокись марганца разлагаются на воду, двуокись марганца, аммоний и хлористый цинк. Угольный стержень (центральный электрод) отдает электроны, которые собираются на цинковом электроде. Элементы этого типа, названные элементами Лекланше, имеют напряжение не более 1,75–1,8 вольт, когда они свежие. Элемент Лекланше общего назначения имеет плотность энергии примерно 66 ватт-часов на килограмм. По мере использования элемента химическая активность уменьшается, и в конце концов ток прекращается. Если элемент долго не использовался, электролитическая паста высыхает, срок его хранения около двух лет. Выходное напряжение элементов этого типа полностью определяется материалами, используемыми для электролита и электродов. Элементы типа АА, типа С, типа D и сухой элемент № 6 (рис. 3-13) сконструированы из одинаковых материалов и, следовательно, имеют одинаковое напряжение. Необходимо заметить, что хотя элемент Лекланше часто относят к угольно-цинковым элементам, уголь не принимает участие в химической реакции, производящей электричество.

Щелочные элементы получили свое название потому, что в них в качестве электролита используется гидроокись калия (КОН). Внешне щелочные элементы очень похожи



на угольно-цинковые. Однако внутреннее устройство щелочного элемента значительно отличается (рис. 3-14). Щелочные элементы имеют напряжение при разомкнутой цепи примерно 1,52 вольта и плотность энергии около 40 ватт-часов на килограмм. Щелочные элементы могут использоваться в более широком диапазоне температур, чем угольно-цинковые. Щелочные элементы лучше работают при умеренных и высоких токах и сохраняют работоспособность более длительное время.

Литиевые элементы (рис. 3-15) имеют более высокие эксплуатационные свойства благодаря литию. Литий сильно взаимодействует с водой. Конструкция литиевого элемента использует литий, двуокись марганца (MnO_2) и перхлорат лития ($LiClO_4$) в органическом растворителе (вода не может быть использована). Выходное напряжение литиевого элемента примерно 3 вольта. Литиевые элементы являются очень эффективными с плотностью энергии около 200 ватт-часов на килограмм. Наибольшее преимущество литиевых элементов в их исключительно долгом сроке хранения — от 5 до 10 лет.

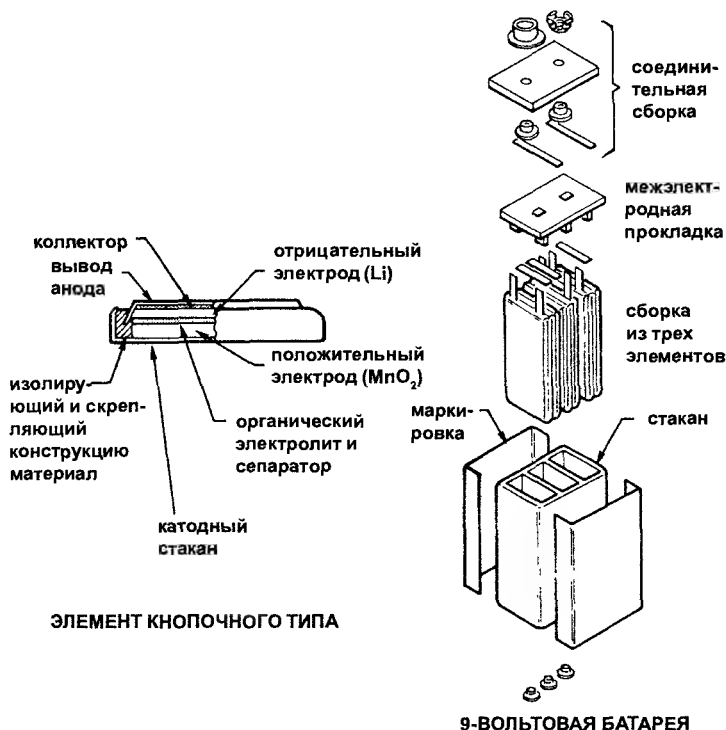


Рис. 3-15. Литиевые элементы обладают исключительно высокой плотностью энергии.

Вторичные элементы — это элементы, которые можно подзаряжать приложением обратного напряжения. Примером является кислотнo-свинцовая батарея, используемая в автомобилях (рис. 3-16). Она изготовлена из шести 12-вольтовых вторичных элементов, соединенных последовательно. Каждый элемент имеет положительный электрод из двуокиси свинца (PbO_2) и отрицательный электрод из пористого свинца (Pb). Электроды разделены пластиком или резиной и погружены в раствор электролита, состоящего из серной кислоты (H_2SO_4) и дистиллированной воды (H_2O). Когда элемент разряжен, серная кислота взаимодействует с окисью свинца и пористым свинцом, превращая их в сульфат свинца, а электролит в воду. При перезарядке

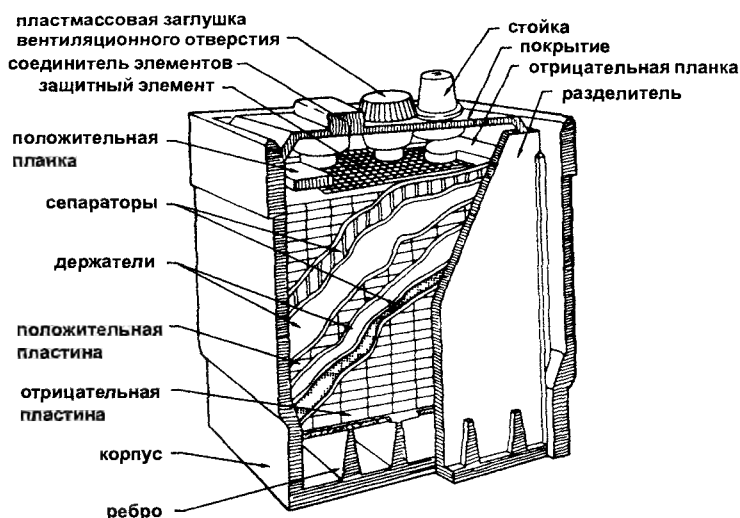


Рис. 3-16. Пример вторичного элемента (в разрезе).

элемента применяется источник постоянного тока с напряжением большим, чем вырабатывает элемент. При протекании тока через элемент электроды превращаются опять в двуокись свинца и пористый свинец, а электролит опять превращается в серную кислоту и воду. Элементы этого типа также называются жидкостными элементами.

Другой тип вторичных элементов — никель-кадмиевые (NiCd) элементы (рис. 3-17). Это сухой элемент, который сохраняет свой заряд длительное время и может многократно перезаряжаться. Элемент состоит из положительного и отрицательного электродов, разделителя, электролита и корпуса. Электроды состоят из порошкообразного никеля, нанесенного на экран из никелевой проволоки, пропитанной раство-



Рис. 3-17. Никель-кадмиевая батарея (NiCd) в качестве другого примера вторичного элемента.



ром соли никеля для положительного электрода и раствором соли кадмия для отрицательного электрода. Разделитель сделан из поглощающего изолирующего материала. Электролитом является гидроксид калия. Корпус изготавливается из стали и плотно закрывается. Типичное напряжение элементов этого типа 1,2 вольта.

Способность батареи непрерывно вырабатывать электроэнергию выражается в **ампер-часах**. Батарея в 100 ампер-часов может выдавать ток в 1 ампер в течение 1 часа ($100 \times 1 = 100$ ампер-часов), либо 10 ампер в течение 10 часов ($10 \times 10 = 100$ ампер-часов), либо 1 ампер в течение 100 часов ($1 \times 100 = 100$ ампер-часов).

3-2. Вопросы

1. Из каких компонентов состоит элемент?
2. Каковы два основных типа элементов?
3. В чем главное отличие двух основных типов элементов?
4. Приведите примеры первичных элементов.
5. Приведите примеры вторичных элементов.

3-3. СОЕДИНЕНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ И БАТАРЕЙ

Элементы и батареи могут быть соединены вместе для увеличения напряжения и/или тока. Они могут быть соединены

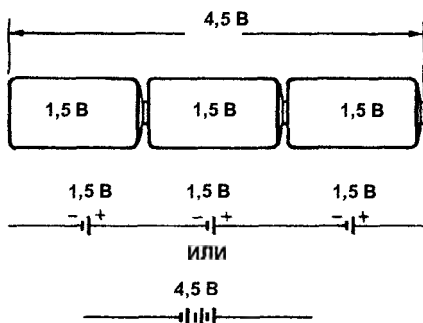


Рис. 3-18. Элементы или батареи могут быть соединены последовательно для увеличения напряжения.

последовательно, параллельно или последовательно-параллельно.

При последовательном соединении элементы или батареи могут быть соединены либо в последовательно-дополняющей либо в последовательно-препятствующей конфигурации. В **последовательно-дополняющей** конфигурации



положительный электрод первого элемента соединяется с отрицательным электродом второго элемента; положительный электрод второго элемента соединяется с отрицательным электродом третьего элемента и так далее (рис. 3-18). При последовательно-дополняющей конфигурации через все элементы или батареи протекает одинаковый ток. Это может быть выражено следующим образом:

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3.$$

Индексы обозначают номера отдельных элементов или батарей. Полное напряжение равно сумме напряжений отдельных элементов и может быть выражено следующим образом:

$$E_T = E_1 + E_2 + E_3.$$

При **последовательно-препятствующей** конфигурации элементы или батареи соединяются друг с другом одноименными выводами, отрицательный вывод с отрицательным или положительный с положительным. Однако эта конфигурация очень мало применяется на практике.

При **параллельном** соединении все положительные выводы соединяются вместе и все отрицательные выводы также соединяются вместе (рис. 3-19). Общий возможный ток является суммой токов каждого элемента или батарей:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3.$$

Общее напряжение равно напряжению каждого отдельного элемента или батареи:

$$E_T = E_1 = E_2 = E_3.$$

Если желательно получить и наибольшее напряжение и наибольший ток, элементы или батареи могут быть соединены в последовательно-параллельной конфигурации. Помните, что последовательное соединение

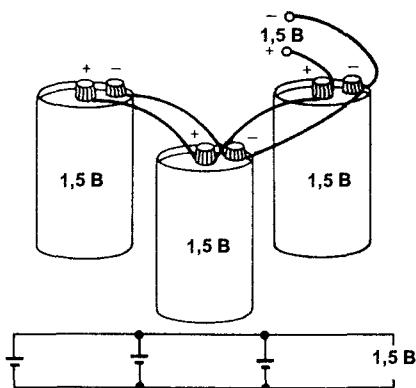


Рис. 3-19. Элементы или батареи могут быть соединены параллельно для увеличения тока.

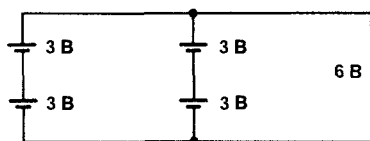


Рис. 3-20. Элементы или батареи могут быть соединены последовательно-параллельно для увеличения выходного тока и напряжения.

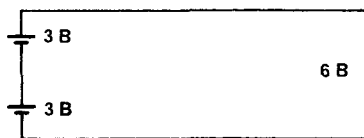


Рис. 3-21. Когда элементы соединяются последовательно, напряжение увеличивается.

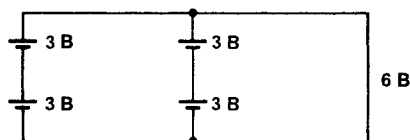


Рис. 3-22. Параллельное соединение последовательно соединенных элементов увеличивает выходной ток. Полученная цепь является последовательно-параллельной конфигурацией.

элементов или батарей увеличивает напряжение, а параллельное соединение увеличивает ток. На рис. 3-20 показаны четыре 3-вольтовых батареи, соединенные в последовательно-параллельной конфигурации. Эта конфигурация дает напряжение 6 вольт и обеспечивает ток в два раза больший, чем отдельная батарея. Для получения 6 вольт необходимо соединить две 3-вольтовые батареи последовательно (рис. 3-21). Для увеличения тока, вторая пара 3-вольтовых батарей подсоединяется параллельно (рис. 3-22). В результате получается последовательно-параллельная конфигурация.

3-3. Вопросы

1. Нарисуйте три элемента, соединенных в последовательно-дополняющей конфигурации.
2. Как влияет последовательно-дополняющая конфигурация на ток и напряжение?
3. Нарисуйте три элемента, соединенные параллельно.
4. Как влияет параллельное соединение элементов на ток и напряжение?



5. Как надо соединить элементы или батареи, чтобы увеличить и ток и напряжение?

3-4. ПРИЛОЖЕННОЕ НАПРЯЖЕНИЕ И ПАДЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

В электрических и электронных цепях существует два типа напряжений — **приложенное напряжение** и **падение напряжения**.

Потенциал или напряжение, подведенное к цепи, называется **приложенным напряжением** (рис. 3-23). Напряжение подсоединено к цепи, ток течет от отрицательного вывода источника напряжения и возвращается к положительному выводу источника напряжения. 12-вольтовая батарея, подсоединенная к цепи дает **приложенное к цепи напряжение 12 вольт**.

При перемещении электронов по цепи они встречают сопротивление. Проходя через нагрузку, электроны теряют энергию. Отданная энергия называется **падением напряжения** (рис. 3-24). В большинстве случаев энергия отдается в виде тепла. Энергия, которую теряют электроны в цепи, равна энергии, сообщаемой им источником.

Еще раз повторим, что энергия, введенная в цепь, называется **приложенным напряжением**. Энергия, выделяемая в цепи на нагрузке, называется **падением напряжения**. Падение напряжения имеет место, когда в цепи течет ток. Ток течет по цепи от отрицательного полюса к положительному. Внутри источника напряжения ток течет от положительного электрода к отрицательному.

Падение напряжения в цепи равно **приложенному к цепи напряжению**, так как энергия не может создаваться или уничтожаться, а только переходит из одной формы в другую. Если 12-вольтовый источник подсоединен к 12-вольтовой лампе, то источник напряжения обеспечивает **приложенное напряжение 12 вольт**, а на лампе происходит **падение напряжения 12 вольт**. Вся энергия потребляется в цепи. Если две одинаковые 6-вольтовые лампы подсоединены последовательно к тому же 12-вольтовому источ-

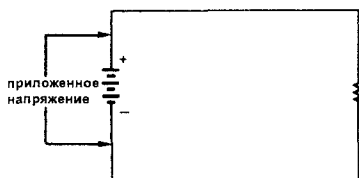


Рис. 3-23. Потенциал, приложенный к цепи, называется приложенным напряжением.

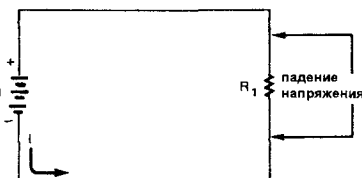


Рис. 3-24. Энергия, поглощенная цепью при прохождении тока через нагрузку (сопротивление), называется падением напряжения. Падение напряжения имеет место при протекании тока в цепи.

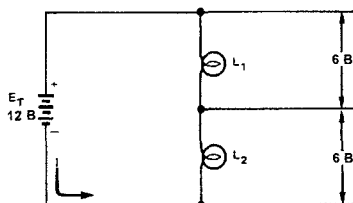


Рис. 3-25. На каждой из двух одинаковых 6-вольтовых ламп, подключенных к источнику 12 вольт, происходит одинаковое падение напряжения по 6 вольт.

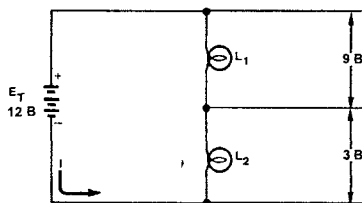


Рис. 3-26. Когда две лампы, рассчитанные на различное напряжение последовательно подсоединены к 12-вольтному источнику, падение напряжения на каждой лампе будет разным, в зависимости от напряжения, на которое рассчитана лампа, и ее сопротивления.

нику (рис. 3-25), то на каждой лампе происходит падение напряжения 6 вольт, а общее падение напряжения равно 12 вольт. Если две разные лампы соединены последовательно, например как 9-вольтовая и 3-вольтовая лампы (рис. 3-26), то на 9-вольтовой лампе происходит падение напряжения 9 вольт, а на 3-вольтовой лампе — 3 вольта. Сумма падений напряжения равна приложенному напряжению 12 вольт.

3-4. Вопросы

1. Что такое приложенное напряжение?



2. Что такое падение напряжения?
3. Если два равных сопротивления подсоединены последовательно к источнику напряжения, то каковы падения напряжений на каждом из сопротивлений?

3-5. ЗАЗЕМЛЕНИЕ КАК УРОВЕНЬ ОТСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ

Земля — это термин, используемый для обозначения нулевого потенциала. Все другие потенциалы являются либо положительными, либо отрицательными по отношению к земле.

Все электрические цепи и приборы заземлены с помощью защитного заземления. Следовательно, между любыми двумя приборами или цепями не существует разности потенциалов, и, следовательно, не будет течь ток. Все цепи связаны с общей точкой на распределительном щитке (который содержит размыкатели или предохранители) (рис. 3-27). Эта общая точка (нейтральная шина) соединена толстым медным проводом с медным стержнем, закопанным в землю или прикреплена к водопроводной трубе. Заземление защищает пользователя от электрического поражения в случае ошибочного соединения.

Защитное заземление используется и в автомобилях. Здесь в качестве земли используется шасси автомобиля. Это можно проверить, посмотрев, куда подсоединены провода от аккумулятора. Обычно отрицательный электрод прикручен болтом прямо к раме автомобиля. Эта и любая другая точка на раме автомобиля рассматривается как земля. Земля служит частью общей электрической цепи.

Таким образом, земля определяется как нулевая точка, относительно которой измеряются все напряжения. Следовательно, напряжение в любой точке цепи может быть измерено по отношению к земле. Измеренное напряжение может быть положительным и отрицательным по отношению к земле.

В больших корпусах электронного оборудования шасси или металлический корпус также служит землей (точ-

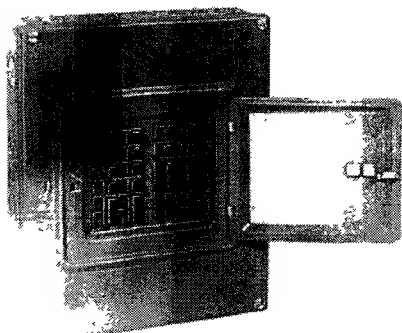


Рис. 3-27. В домовом распределительном щитке все цепи связаны с общей точкой (нейтральной шиной).

кой отсчета), как и в автомобиле. В небольших электронных устройствах, которые используют пластмассовый корпус, все компоненты связаны с печатной платой. В этом случае землей является медная подложка печатной платы, которая работает как общая точка цепи.

3-5. Вопросы

1. Для чего используется заземление?
2. Что является целью заземления?
3. Как электрическая земля используется в автомобиле?
4. Как электрическая земля используется в корпусах электронного оборудования?
5. Какую функцию выполняет земля при проведении измерений напряжения в электронике?

РЕЗЮМЕ

- Напряжение возникает при одновременном возникновении избытка и недостатка электронов на разных концах проводника.
- Источник напряжения обеспечивает способ преобразования некоторых видов энергии в электрическую.



- Шестью основными источниками напряжения являются: трение, магнетизм, химический, свет, тепло и давление.
- Магнетизм является основным методом, используемым для получения напряжения.
- Химические элементы являются вторым основным методом получения напряжения.
- Напряжение может также быть использовано для получения магнетизма, химических реакций, света, тепла и давления.
- Элемент содержит положительный и отрицательный электроды, разделенные раствором электролита.
- Батарея является комбинацией двух или более элементов.
- Элементы, которые не могут быть заряжены, называются первичными элементами.
- Элементы, которые можно подзаряжать, называются вторичными элементами.
- Сухие элементы являются первичными элементами.
- Жидкостно-кислотные батареи и никель-кадмиевые (NiCd) элементы являются примерами вторичных элементов.
- Элементы и батареи могут быть соединены последовательно, параллельно или последовательно-параллельно для повышения напряжения, тока или и того, и другого.
- Когда элементы или батареи соединены в последовательно-дополняющей конфигурации, выходной ток остается таким же, как у каждого элемента в отдельности, а выходное напряжение увеличивается:

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3, \quad E_T = E_1 + E_2 + E_3.$$

- Когда элементы или батареи соединены параллельно, выходное напряжение остается таким же, как и у отдельного элемента, а выходной ток увеличивается:

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3, \quad E_T = E_1 = E_2 = E_3.$$

- Последовательно-параллельная комбинация увеличивает как выходное напряжение, так и выходной ток.
- Напряжение, подключаемое к цепи, рассматривается как приложенное напряжение.



- Энергия, потребляемая цепью, рассматривается как падение напряжения.
- Падение напряжения в цепи равно приложенному напряжению.
- Защитное заземление создает на всех приборах и оборудовании одинаковый потенциал и используется для предотвращения электрического поражения.
- Защитное заземление обеспечивает общую точку отсчета.

Глава 3. САМОПРОВЕРКА

1. Действительно ли ток и напряжение выполняют работу в цепи?
2. Перечислите шесть видов энергии, которые могут быть использованы для получения электричества.
3. Чем характеризуются вторичные элементы?
4. Нарисуйте последовательно-параллельную комбинацию, которая будет выдавать 9 вольт при 1 ампере. Используйте 1,5 вольтовые элементы, дающие по 250 миллиампер.
5. Какое падение напряжения на трех лампах: 3 вольта, 3 вольта и 6 вольт при приложенном напряжении 9 вольт?

Глава 4. СОПРОТИВЛЕНИЕ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Дать определение допустимого отклонения от номинального сопротивления (допуска) резистора.
- Описать композиционные, углеродистые, проволоочные и пленочные резисторы.
- Описать работу переменного резистора.
- Описать три типа цепей с резисторами.
- Вычислить общее сопротивление последовательной, параллельной и последовательно-параллельной цепей.

Сопротивление — это противодействие протеканию тока. Некоторые материалы, такие как стекло или резина, оказывают сильное противодействие протеканию тока. Другие материалы, такие как серебро и медь, оказывают малое противодействие протеканию тока.

В этой главе исследуются характеристики сопротивления, типы резисторов и различные типы соединений сопротивлений в цепи.

4-1. СОПРОТИВЛЕНИЯ

Сопротивление является свойством всех электрических элементов. Иногда влияние сопротивления нежелательно, а иногда полезно. **Резисторы** являются элементами, изготовленными так, чтобы оказывать определенное сопротивление протеканию тока. Резистор является наиболее часто используемым элементом электрических цепей и представляет собой устройство, оказывающее определенное сопротивление току. Резисторы бывают с постоянным и переменным значениями сопротивления. Они имеют различные формы и размеры, в зависимости от условий их применения и предъявляемым к ним требованиям (рис. 4-1 и



Рис. 4-1. Постоянные резисторы бывают различных размеров и форм.

4-2). Резисторы изображаются на схеме в виде зигзагообразной линии, как показано на рис. 4-3.

Разница между номинальным и действительным сопротивлениями, выраженная в процентах по отношению к номинальному сопротивлению, называется допускаемым отклонением от номинального сопротив-

ления или **допуском**. Производить резисторы с точным значением сопротивления, когда в этом нет необходимости, очень дорого. Следовательно, чем больше допуск, тем дешевле обходится производство резистора. Резисторы выпускаются с допусками $\pm 20\%$, $\pm 10\%$, $\pm 5\%$, $\pm 2\%$ и $\pm 1\%$. Точные резисторы имеют еще меньшие допуски. В большинстве электронных цепей применение резисторов с допуском 10% является удовлетворительным.

ПРИМЕР. В каких пределах может находиться сопротивление резистора номиналом в 1000 Ом и допуском 20%?

Решение: $1000 \times 0,2 = \pm 200 \text{ Ом}$.

Допуск равен $\pm 200 \text{ Ом}$. Следовательно, резистор номиналом 1000 Ом может иметь сопротивление, лежащее в пределах от 800 до 1200 Ом.



Потенциометр горячего формования

Подстроечный потенциометр

Подстроечный потенциометр

Рис. 4-2. Переменные резисторы имеют различные конструкции, соответствующие требованиям производителей электронного оборудования.



Рис. 4-3 Схематическое обозначение постоянного резистора

Для единообразия производители выпускают резисторы со стандартными номинальными значениями. На рис. 4-4 перечислены стандартные номиналы резисторов с допусками $\pm 5\%$, $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$. Эти значения должны быть умножены на 10^n , где $n = 1, 2, 3$ и т.д. для получения реально существующих величин резисторов.

Резисторы делятся на четыре основные категории, в соответствии с материалом, из которого они сделаны: углеродистые резисторы, композиционные резисторы, проволочные резисторы и пленочные резисторы.

В электронных цепях обычно используются *углеродистые резисторы* (рис. 4-5). Эти резисторы недороги и выпускаются со стандартными значениями номиналов.

Проволочный резистор изготовлен из никель-хромовой проволоки (нихрома), намотанной на керамический корпус (рис. 4-6). Выводы резистора закреплены, а сам он залит покрытием. Проволочные резисторы используются в цепях, где протекают большие токи и необходима высокая точность. Диапазон значений проволочных резисторов — от долей ома до нескольких тысяч ом.

$\pm 5\%$ допуск	$\pm 10\%$ допуск	$\pm 20\%$ допуск
1,0	1,0	1,0
1,1		
1,2	1,2	
1,3		
1,5	1,5	1,5
1,6		
1,8	1,8	
2,0		
2,2	2,2	2,2
2,4		
2,7	2,7	
3,0		
3,3	3,3	3,3
3,6		
3,9	3,9	
4,3		
4,7	4,7	4,7
5,1		
5,6	5,6	
6,2		
6,8	6,8	6,8
7,5		
8,2	8,2	
9,1		

Рис. 4-4. Стандартные номиналы резисторов (исключая множитель).

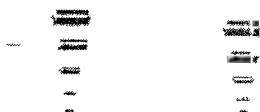


Рис. 4-5. Углеродистые резисторы наиболее широко используются в электронных цепях.

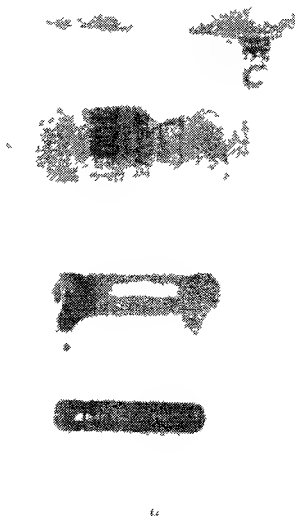


Рис. 4-6. Проволочные резисторы отличаются по конструктивному выполнению.

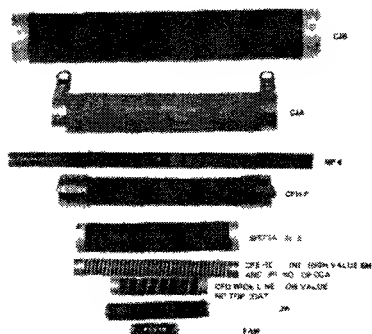


Рис. 4-7. Пленочный резистор сочетает размер углеродного резистора и точность проволочного резистора.



Рис 4-8 Резисторы на основе окиси олова.



В последнее время начали приобретать популярность *пленочные резисторы* (рис. 4-7). Они сочетают малые размеры композиционного резистора с точностью проволочного резистора. Тонкая пленка углерода или металлического сплава нанесена на цилиндрический керамический корпус и герметизирована эпоксидным или стеклянным покрытием. Чем меньше шаг спирали, тем выше сопротивление. Углеродные пленочные резисторы выпускаются номиналами от 10 Ом до 10 МОм при допуске от 1 до 20%. Металлопленочные резисторы физически подобны резисторам из углеродных пленок, но более дороги. Они выпускаются номиналами от 10 Ом до 10 МОм при допуске от 1 до 10%, хотя допуск может достигать $\pm 20\%$. Другой тип

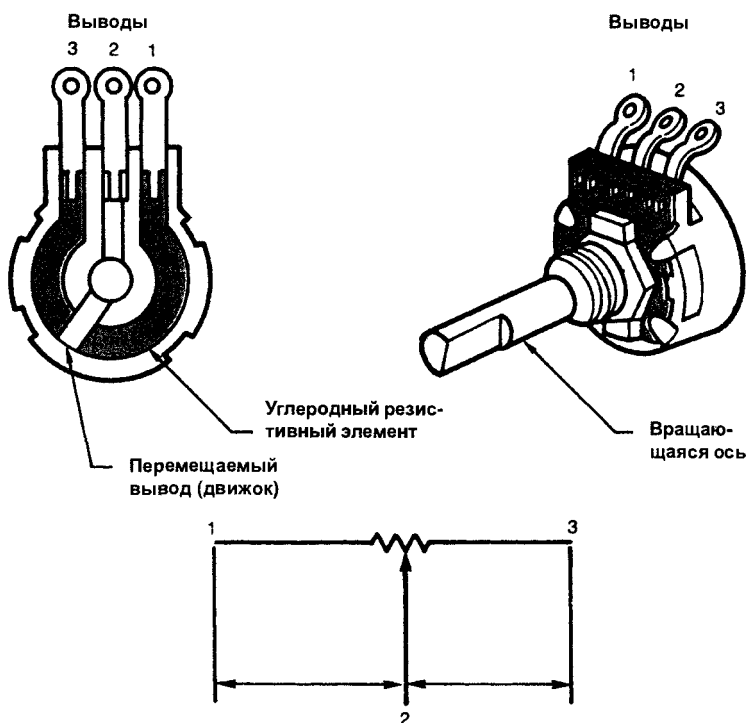


Рис. 4-9. Переменные резисторы позволяют изменять сопротивление (увеличивать или уменьшать).

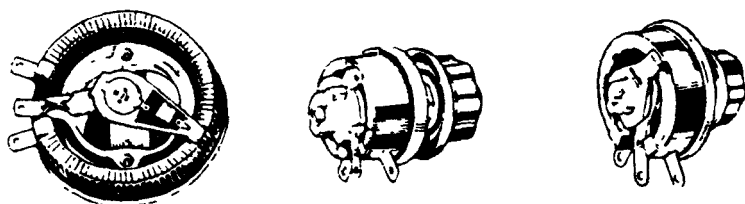


Рис. 4-10. Реостат — это переменный резистор, использующийся для управления током.

пленочного резистора — это резистор на основе пленок окиси олова (рис. 4-8). Он состоит из пленки окиси олова на керамической подложке.

Переменные резисторы позволяют изменять сопротивление. Они содержат резистивный элемент либо из углеродной композиции, либо из проволоки, имеющий два вывода. Третий вывод соединен с перемещаемым движком, связанным с осью. Когда ось вращается, движок скользит по резистивному элементу. По мере вращения оси сопротивление между центральным выводом и одним из крайних выводов увеличивается, тогда как сопротивление между центральным выводом и другим крайним выводом уменьшается (рис. 4-9). Переменные резисторы бывают с линейно изменяющимся сопротивлением (линейный регулятор) и с логарифмически изменяющимся сопротивлением (аудио-регулятор).

Переменный резистор, используемый для управления напряжением, называется **потенциометром**. Переменный резистор, используемый для управления током, называется **реостат** (рис. 4-10).

4-1. Вопросы

1. В чем цель спецификации допуска резистора?
2. Каковы четыре основных типа постоянных резисторов?
3. В чем преимущество пленочных резисторов перед углеродистыми резисторами?
4. Объясните как работает переменный резистор.



4-2. МАРКИРОВКА РЕЗИСТОРОВ

Маленький размер резистора не позволяет напечатать на корпусе его номинал и допуск. Поэтому для обозначения номинала резистора используется кодировка с помощью цветных полос. Эти полосы можно увидеть и прочесть при любом положении резистора на плате. На рис. 4-11 показана цветная кодировка, разработанная Ассоциацией Электронной Промышленности США (EIA).

Цветные полосы на резисторе означают следующее. Первая полоса, ближайшая к концу резистора, представляет первую цифру номинала резистора, а вторая — вторую цифру номинала. Третья полоса обозначает количество нулей, которое должно быть добавлено к первым двум цифрам. Четвертая полоса соответствует допуску резистора (рис. 4-12).

Например, резистор, показанный на рис. 4-13, имеет номинальное сопротивление 1500 Ом. Коричневая полоса (первая) представляет первую цифру (1). Зеленая полоса (вторая) представляет вторую цифру (5). Красная полоса (третья) указывает число нулей (два нуля — 00), которые должны быть добавлены к первым двум цифрам. Серебряная полоса (четвертая) сообщает допуск сопротивления $\pm 10\%$. Таким образом имеем резистор сопротивлением 1500 Ом и с допуском $\pm 10\%$.

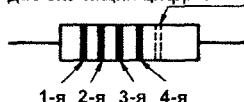
Резистор может иметь пятую полосу (рис. 4-14). Эта полоса указывает на пригодность резистора для военных целей — это максимальное число резисторов (на тысячу), которые могут выйти из строя через 100 часов работы. Вообще, когда на резисторе имеется пять полос, первая и последняя полосы находятся на одинаковом расстоянии от концов. В этом случае, надо найти полосу допуска (золотую или серебряную) и считать эту сторону правой. Затем можно читать номинал резистора, как описано выше.

Существуют два исключения, когда третья полоса не означает количество нулей. В этом случае первые две цифры должны быть умножены на 0,1. Для резистора, номинальное сопротивление которого меньше 10 Ом, третья



ЦВЕТОВАЯ КОДИРОВКА РЕЗИСТОРОВ

Цветовой код, использующий
две значащих цифры



Замечание: может присутствовать пятая полоса, которая представляет фактор надежности и может быть проигнорирована.

ЦВЕТНЫЕ ПОЛОСЫ				
	Первая	Вторая	Количество нулей	Допуск четвертая
Черный	0	0	—	
Коричневый	1	1	0	
Красный	2	2	00	
Оранжевый	3	3	000	
Желтый	4	4	0 000	
Зеленый	5	5	00 000	
Синий	6	6	000 000	
Фиолетовый	7	7		
Серый	8	8		
Белый	9	9		
Золотой			0,1	5%
Серебряный			0,01	10%
Нет полосы				20%

Цветовой код, использующий три значащие цифры для резисторов с допуском 1%

ЦВЕТНЫЕ ПОЛОСЫ				
	Первая	Вторая	Третья	Множитель четвертая
Черный	0	0	0	—
Коричневый	1	1	1	0
Красный	2	2	2	00
Оранжевый	3	3	3	000
Желтый	4	4	4	0 000
Зеленый	5	5	5	00 000
Синий	6	6	6	000 000
Фиолетовый	7	7	7	
Серый	8	8	8	
Белый	9	9	9	
Золотой				0,1
Серебряный				0,01

Рис. 4-11. Цветной код Ассоциации Электронной Промышленности (EIA).

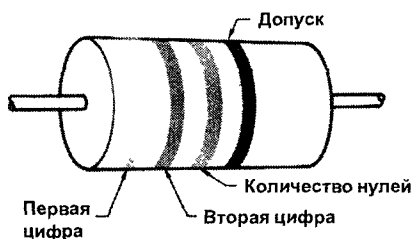


Рис. 4-12. Значение цветных полос на резисторе из углеродной композиции.

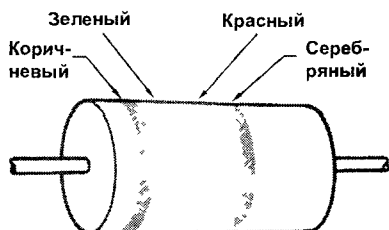


Рис. 4-13. Этот резистор имеет номинальное сопротивление 1500 Ом.

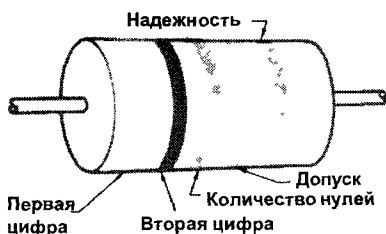


Рис. 4-14. Пятая полоса на резисторе указывает надежность резистора.

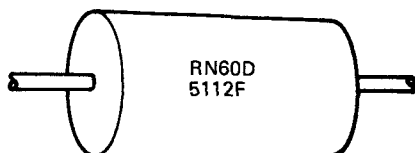


Рис. 4-15. Номинал резистора может быть указан буквенно-цифровым кодом.

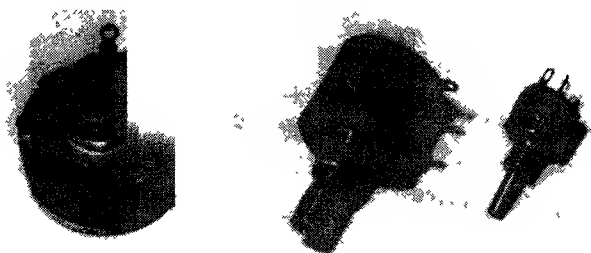


Рис. 4-16. На по диометрах (переменных резисторах) также нанесены их номиналы.



полоса золотая. Это означает, что первые две цифры должны быть умножены на 0,1. Для резистора, номинальное сопротивление которого меньше 1 ома, третья полоса серебряная. Это означает, что первые две цифры должны быть умножены на 0,01.

Резистор также может быть идентифицирован с помощью цифробуквенной системы (рис. 4-15). Например, RN60D5112F означает следующее:

- RN60 Тип резистора (композиционный, проволочный, пленочный)
- D Характеристика (влияние температуры)
- 5112 Номинальное значение сопротивления (2 представляет количество нулей)
- F Допуск

В соответствии с российским ГОСТ¹ на каждом непроволочном резисторе указывается номинальное сопротивление, допустимое отклонение сопротивления от номинального и тип резистора. Если уровень шумов резистора не меньше 1 мкВ/В, на нем ставится буква А. Для резисторов новых типов принята система сокращенных обозначений. Постоянные резисторы обозначаются буквой С, переменные — буквами СП. Цифра, стоящая после букв, обозначает: 1 — углеродистый, 2 — металлопленочный или металлооксидный, 3 — пленочный композиционный, 4 — объемный композиционный, 5 — проволочный. После дефиса следует номер разработки резистора.

В зависимости от размеров резистора применяются полные или сокращенные (кодированные) обозначения номинального сопротивления и допустимых отклонений. Кодированные обозначения состоят из трех или четырех знаков, включающих две или три цифры и букву. Буква кода означает множитель, составляющий значение сопротивления, и определяет положение запятой десятичной дроби. Буквами R, K, M, G, T обозначаются множители 1, 10^3 , 10^6 , 10^9 , 10^{12} соответственно, для значения сопротивления, выраженного

¹ Этот и следующий абзацы добавлены при переводе (прим ред.)



в омах. Например, 5,6 Ом — 5R6; 150 Ом — 150R; 5,1 кОм — 5K1; 3,3 МОм — 3M3; 1,5 ГОм — IG5.

На потенциометрах (переменных резисторах) также отпечатаны их номинальные значения (рис. 4-16). Это могут быть действительные значения или буквенно-цифровой код. В системе, использующей буквенно-цифровой код, номинальное значение сопротивления определяется последней частью кода.

4-2. Вопросы

1. Запишите цветной код по памяти.
2. Что означают четыре полосы на резисторе из углеродной композиции?
3. Декодируйте следующие резисторы:

	1-я полоса	2-я полоса	3-я полоса	4-я полоса
а.	Коричневый	Черный	Красный	Серебряный
б.	Синий	Зеленый	Оранжевый	Золотой
в.	Оранжевый	Белый	Желтый	(нет)
г.	Красный	Красный	Красный	Серебряный
д.	Желтый	Фиолетовый	Коричневый	Золотой
4. Что показывает пятая полоса на резисторе?
5. Что обозначает золотая или серебряная третья полоса на резисторе?

4-3. СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Существует три наиболее важных типа соединения резистивных цепей: **последовательная цепь**, **параллельная цепь** и **последовательно-параллельная цепь** (рис. 4-17). *Последовательно соединенная цепь* имеет один общий ток. Параллельное соединение имеет одно общее напряжение, а количество токов определяется количеством соединенных параллельно элементов. *Последовательно-параллельная цепь* является комбинацией последовательной и параллельной цепей.

4-3. Вопрос

1. Каковы три основных типа конфигурации цепей?

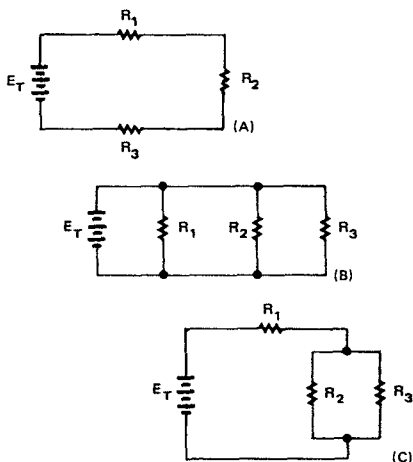


Рис. 4-17. Три типа резистивных цепей: (А) последовательная цепь, (В) параллельная цепь, (С) последовательно-параллельная цепь.

4.4. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Последовательная цепь содержит два или более, соединенных последовательно, резисторов, через которые протекает один общий ток. Ток электронов течет от отрицательного вывода источника тока через каждый резистор к положительному выводу источника тока. Если для протекания тока между двумя точками цепи существует только один путь, то цепь является последовательной.

Чем больше резисторов соединено последовательно, тем больше противодействие протеканию тока. Другими словами, при добавлении резистора в цепь последовательно, общее сопротивление цепи возрастает. Общее сопротивление последовательной цепи является суммой отдельных сопротивлений цепи:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

Цифровые индексы относятся к отдельным сопротивлениям цепи. R_n — это последний резистор в цепи. Символ R_T обозначает общее сопротивление цепи.

ПРИМЕР: Чему равно общее сопротивление цепи, показанной на рис. 4-18?

Дано:
 $R_T = ?$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$



$$R_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 20 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 30 \text{ Ом}$$

$$R_T = 10 + 20 + 30$$

$$R_T = 60 \text{ Ом}$$

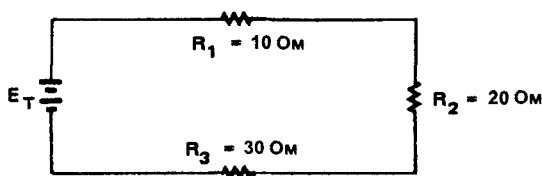


Рис. 4-18.

ПРИМЕР: Вычислите общее сопротивление цепи, показанной на рис. 4-19.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 1 \text{ кОм}$$

$$R_2 = 4,7 \text{ кОм}$$

$$R_3 = 3,9 \text{ кОм}$$

$$R_4 = 820 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 10 \text{ кОм}$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5$$

$$R_T = 1 \text{ кОм} + 4,7 \text{ кОм} + 3,9 \text{ кОм} + 0,82 \text{ кОм} + 10 \text{ кОм}$$

$$R_T = 1000 + 4700 + 3900 + 820 + 10000$$

$$R_T = 20420 \text{ Ом}$$

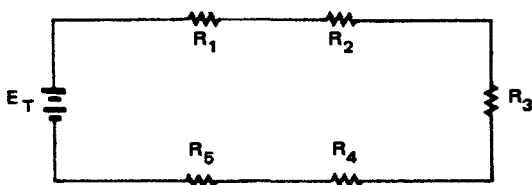


Рис. 4-19.

4-4. Вопросы

1. Напишите формулу для определения общего сопротивления в последовательно соединенной цепи.
2. Чему равно общее сопротивление цепи с тремя резисторами — 1500 Ом, 3300 Ом и 4700 Ом — соединенными последовательно? (Сначала нарисуйте цепь).



4-5. ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Параллельная цепь содержит два или более резистора, по каждому из которых течет свой ток. Каждый путь тока в параллельной цепи называется *ветвью*. Ток течет от отрицательного вывода источника тока через каждую ветвь параллельной цепи к положительному выводу источника тока. Если в цепи с двумя или более резисторами существует более одного пути для протекания тока между двумя точками, то цепь называется параллельной.

Чем больше резисторов соединено параллельно, тем меньше противодействие протеканию тока. Чем меньше противодействие протеканию тока, тем меньше сопротивление цепи. Другими словами, когда резисторы соединены в цепи параллельно, то общее сопротивление цепи уменьшается, так как обеспечиваются дополнительные пути для протекания тока. Общее сопротивление параллельной цепи всегда меньше, чем сопротивление любой ветви.

Общее сопротивление параллельной цепи определяется формулой:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n},$$

где R_T — общее сопротивление, R_1 , R_2 и R_3 — отдельные резисторы (ветви), а R_n — номер последнего резистора в цепи.

ПРИМЕР: Чему равно полное сопротивление цепи, изображенной на рис. 4-20?

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 20 \text{ Ом}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{10} + \frac{1}{20} + \frac{1}{30} \quad (\text{общий знаменатель равен 60})$$

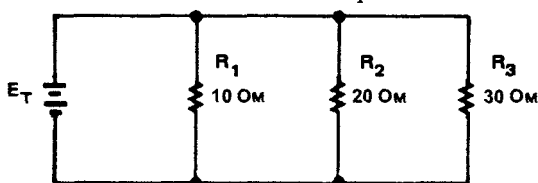


Рис. 4-20.



$$R_3 = 30 \text{ Ом}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{6}{60} + \frac{3}{60} + \frac{2}{60} = \frac{11}{60}$$

$$R_T = 5,45 \text{ Ом.}$$

Заметим, что полное сопротивление меньше, чем сопротивление наименьшего из резисторов. Цепь, показанная на рис. 4-20, может быть заменена одним резистором 5,45 Ом.

ПРИМЕР: Вычислите полное сопротивление цепи, показанной на рис. 4-21.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 1 \text{ кОм (1000 Ом)}$$

$$R_2 = 4,7 \text{ кОм (4700 Ом)}$$

$$R_3 = 3,9 \text{ кОм (3900 Ом)}$$

$$R_4 = 820 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 10 \text{ кОм (1000 Ом)}$$

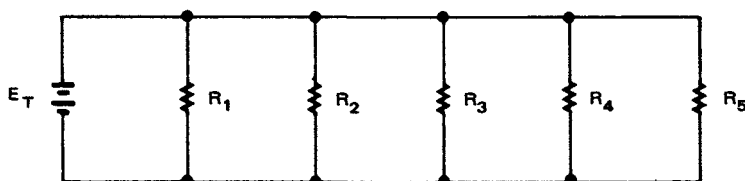


Рис. 4-21.

Решение:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{4700} + \frac{1}{3900} + \frac{1}{820} + \frac{1}{10000}$$

Так как найти в этом случае общий знаменатель довольно сложно, то будем работать с десятичными дробями.

$$\frac{1}{R_T} = 0,001 + 0,000213 + 0,000256 + 0,00123 + 0,0001$$



$$\frac{1}{R_T} = 0,002799$$

$$1R_T = \frac{1}{0,002799}$$

$$R_T = 357,27 \text{ Ом}$$

ПРИМЕР: Каково должно быть сопротивление резистора, подключенного параллельно резистору в 47 Ом для того, чтобы общее сопротивление цепи было 27 Ом? См. рис. 4-22.

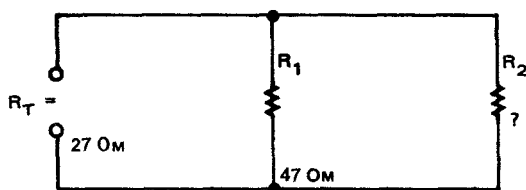


Рис. 4-22.

Дано:

$$R_T = 27 \text{ Ом}$$

$$R_1 = 47 \text{ Ом}$$

$$R_2 = ?$$

Решение:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{27} = \frac{1}{47} + \frac{1}{R_2}$$

$$0,0370 - 0,0213 = \frac{1}{R_2}$$

$$0,0157 = \frac{1}{R_2}$$

$$R_2 = 63,69 \text{ Ом.}$$

Заметим, что 63,69 ома не является стандартным номиналом резистора. Используйте резистор с ближайшим стандартным номиналом, который равен 62 ома.

4-5. Вопросы

1. Напишите формулу для определения общего сопротивления параллельной цепи.
2. Каково общее сопротивление цепи, содержащей три резистора — 1500 Ом, 3300 Ом и 4700 Ом — соединенных параллельно? (Сначала нарисуйте цепь).



4-6. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЕ РЕЗИСТОРОВ

Последовательно-параллельная цепь является комбинацией последовательной и параллельной цепей. На рис. 4-23 показана простая последовательно-параллельная цепь, состоящая из резисторов. Заметим, что R_2 и R_3 соединены параллельно и эта параллельная комбинация соединена последовательно с R_1 и R_4 . Ток течет от отрицательного вывода источника тока через резистор R_4 и делится в точке А, протекая через две ветви R_2 и R_3 . В точке В ток соединяется и протекает через R_1 .

Общее сопротивление последовательно-параллельной цепи вычисляется с помощью формул для последовательного соединения:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 \dots + R_n,$$

и параллельного соединения:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Большинство цепей может быть разбито на простые параллельные и последовательные цепи. Процедура вычисления общего сопротивления состоит из следующих этапов:

1. Вычисление общего сопротивления параллельных участков цепи для определения эквивалентных сопротивлений.
2. Если в параллельных участках цепи есть последовательно включенные сопротивления, то сначала нужно вычислить эквивалентное сопротивление последовательно включенных элементов цепи.
3. После вычисления эквивалентных сопротивлений перерисуйте цепь, заменяя параллельные участки цепи эквивалентными сопротивлениями.
4. Проведение окончательных вычислений.

ПРИМЕР: Чему равно полное сопротивление цепи, показанной на рис. 4-23?



Первый шаг — это определение эквивалентного сопротивления (R_A) участка, содержащего R_2 и R_3 .

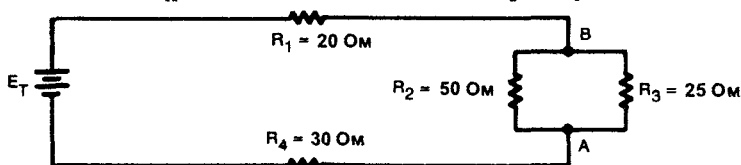


Рис. 4-23.

Дано:

$$R_A = ?$$

$$R_2 = 50 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 25 \text{ Ом}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{50} + \frac{1}{25}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{50} + \frac{2}{50} = \frac{3}{50}$$

$$R_A = \frac{50}{3}$$

$$R_A = 16,7 \text{ Ом.}$$

Перефисуем цепь, подставив эквивалентное сопротивление параллельного участка. См. рис. 4-24.

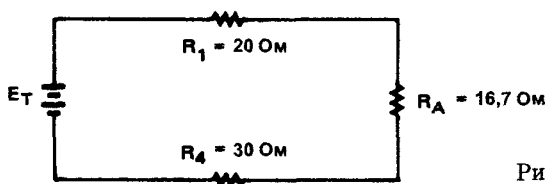


Рис. 4-24.

Теперь определим полное сопротивление последовательной эквивалентной цепи.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 20 \text{ Ом}$$

$$R_A = 16,7 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 30 \text{ Ом}$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_A + R_4$$

$$R_T = 20 + 16,7 + 30$$

$$R_T = 66,7 \text{ Ом}$$



ПРИМЕР: вычислить полное сопротивление цепи, изображенной на рис. 4-25.

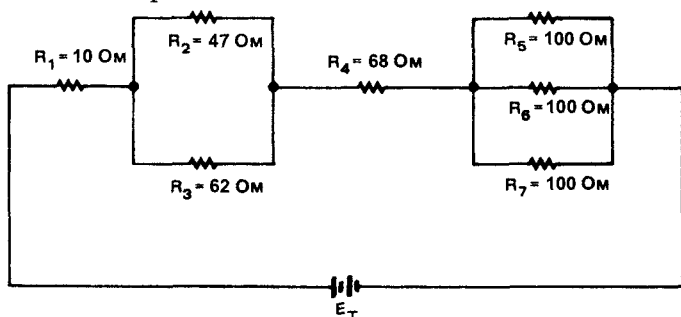


Рис. 4-25.

Сначала найдем эквивалентное сопротивление (R_A) параллельно соединенных резисторов R_2 и R_3 . После этого найдем эквивалентное сопротивление (R_B) параллельно соединенных резисторов R_5 , R_6 и R_7 .

Дано:

$$R_A = ?$$

$$R_2 = 47 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 62 \text{ Ом}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{47} + \frac{1}{62}$$

$$\frac{1}{R_A} = 0,0213 + 0,0161 = 0,0374$$

$$R_A = \frac{1}{0,0374}$$

$$R_A = 26,7 \text{ Ом}$$

Дано:

$$R_B = ?$$

$$R_5 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_7 = 100 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7}$$

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{100} + \frac{1}{100} + \frac{1}{100} = \frac{3}{100}$$



$$R_B = \frac{100}{3}$$

$$R_B = 33,3 \text{ Ом.}$$

Теперь перерисуем цепь, используя эквивалентные сопротивления R_A и R_B и определим полное сопротивление эквивалентной последовательной цепи. См. рис. 4-26.

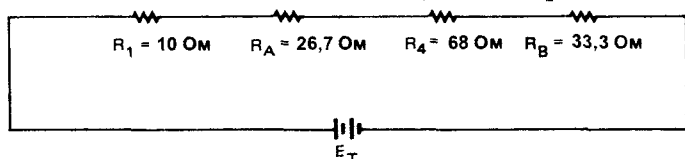


Рис. 4-26.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 10 \text{ Ом}$$

$$R_A = 26,7 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 68 \text{ Ом}$$

$$R_B = 33,3 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_A + R_4 + R_B$$

$$R_T = 10 + 26,7 + 68 + 33,3$$

$$R_T = 138 \text{ Ом.}$$

Цепь, показанная на рис. 4-25, может быть заменена одним резистором номиналом 138 Ом (рис. 4-27).



Рис. 4-27.

ПРИМЕР: Найдите полное сопротивление цепи, изображенной на рис. 4-28.

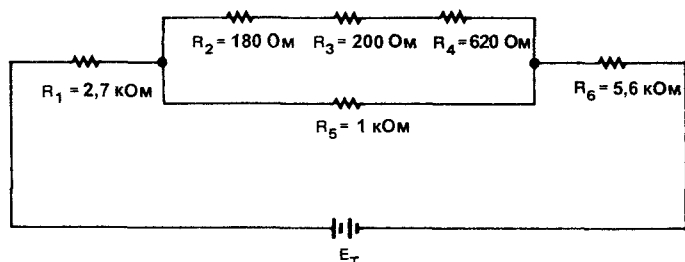


Рис. 4-28.



Эквивалентное сопротивление последовательного участка в параллельной цепи должно определяться первым. Оно обозначено R_S .

Дано:

$$R_S = ?$$

$$R_2 = 180 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 200 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 620 \text{ Ом}$$

Решение:

$$R_S = R_2 + R_3 + R_4$$

$$R_S = 180 + 200 + 620$$

$$R_S = 1000 \text{ Ом.}$$

Перечертим цепь, заменяя последовательно соединенные резисторы R_2 , R_3 и R_4 эквивалентным сопротивлением R_S . См. рис. 4-29.

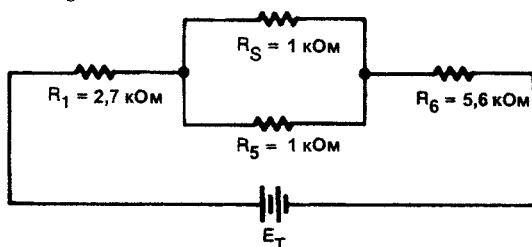


Рис. 4-29.

Определим эквивалентное сопротивление R_A параллельно соединенных резисторов R_S и R_5 .

Дано:

$$R_A = ?$$

$$R_S = 1000 \text{ Ом}$$

$$R_5 = 1000 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_S} + \frac{1}{R_5}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{1000} = \frac{2}{1000}$$

$$R_A = \frac{1000}{2}$$

$$R_A = 500 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь опять, заменив параллельно соединенные резисторы R_S и R_5 эквивалентным сопротивлением R_A , и определим полное сопротивление полученной последовательной цепи. См. рис. 4-30.

Дано:

$$R_T = ?$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_A + R_6$$

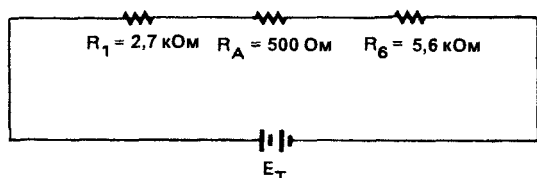


Рис. 4-30.

$$R_1 = 2700 \text{ Ом}$$

$$R_T = 2700 + 500 + 5600$$

$$R_A = 500 \text{ Ом}$$

$$R_T = 8800 \text{ Ом.}$$

$$R_B = 5600 \text{ Ом.}$$

Цепь, показанная на рис. 4-28, может быть заменена одним резистором сопротивлением 8800 Ом (рис. 4-31).



Рис. 4-31.

4-6. Вопрос

1. Чему равно полное сопротивление цепи, в которой резисторы 1500 Ом и 3300 Ом соединены параллельно, а затем последовательно с резистором 4700 Ом? (Сначала нарисуйте цепь).

РЕЗЮМЕ

- Резисторы бывают постоянные и переменные.
- Разница между номинальным и действительным сопротивлениями, выраженная в процентах по отношению к номинальному сопротивлению, называется допуском.
- Резисторы бывают углеродистые, композиционные, проволочные и пленочные.
- Углеродистые резисторы являются наиболее широко используемыми резисторами.
- Проволочные резисторы используются в цепях с большими значениями токов, в которых выделяется большое количество тепла.



- Пленочные резисторы имеют малые размеры и высокую точность.
- Переменные резисторы, которые используются для управления напряжением, называются потенциометрами.
- Переменные резисторы, которые используются для управления током, называются реостатами.
- Номинал резистора может быть определен по его маркировке.
- Номиналы резисторов указываются в цифробуквенной системе.
- Полное сопротивление последовательно соединенной цепи определяется формулой:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

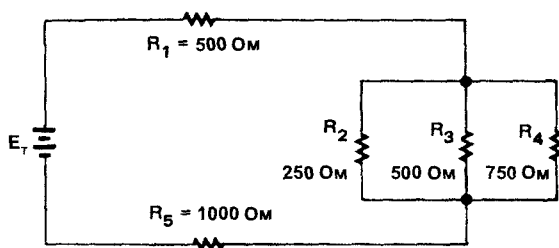
- Полное сопротивление параллельно соединенной цепи определяется формулой:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

- Полное сопротивление последовательно-параллельной цепи определяется как формулой для последовательного соединения, так и формулой для параллельного соединения.

Глава 4. САМОПРОВЕРКА

1. Опишите, как определяется сопротивление материала?
2. В каких пределах может находиться сопротивление резистора номиналом 2200 Ом с допуском 10% ?
3. Запишите маркировку для следующих резисторов:
 - а. 5600 Ом $\pm 5\%$
 - б. 1,5 МОм $\pm 10\%$
 - в. 2,7 Ом $\pm 5\%$
 - г. 100 Ом $\pm 20\%$
 - д. 470 кОм $\pm 10\%$
4. Определите полное сопротивление показанной цепи.



5. Опишите, как проходит ток через последовательно-параллельную цепь.

Глава 5. ЗАКОН ОМА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать три основных части цепи.
- Описать три типа конфигурации цепей.
- Описать, как можно изменять ток в цепи.
- Дать определение закона Ома, связывающего ток, напряжение и сопротивление.
- С помощью закона Ома находить ток, напряжение и сопротивление в последовательных, параллельных и последовательно-параллельных цепях.
- Описать отличия протекания полного тока в последовательных и параллельных цепях.
- Описать различия полного падения напряжения в последовательных и параллельных цепях.
- Описать различия полного сопротивления в последовательных и параллельных цепях.

Закон Ома определяет связь трех фундаментальных величин: силы тока, напряжения и сопротивления. Он утверждает, что сила тока прямо пропорциональна напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению.

В этой главе исследуется закон Ома и его применение к электрическим цепям. Некоторые понятия были введены в предыдущих главах.

5-1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

Как установлено ранее, ток течет из точки с избытком электронов в точку с дефицитом электронов. Путь, по которому следует ток, называется *электрической цепью*. Все электрические цепи состоят из источника тока, нагрузки и проводников. *Источник тока* обеспечивает разность потенциалов, которая позволяет течь току. *Источником тока*



может быть батарея, генератор или другое устройство, описанное в главе 3. *Нагрузка* оказывает сопротивление протеканию тока. Это сопротивление может быть высоким или низким, в зависимости от назначения цепи. Ток в цепи течет через *проводники* от источника к нагрузке. Проводник должен легко отдавать электроны. В большинстве проводников используется медь.

Путь электрического тока к нагрузке может проходить через три типа цепей: последовательную цепь, параллельную или последовательно-параллельную цепи. Последовательная цепь (рис. 5-1) предоставляет току только один

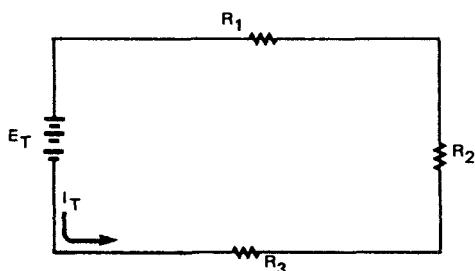


Рис. 5-1. Последовательная цепь предоставляет один путь для протекания тока.

путь от источника к нагрузке. Параллельная цепь (рис. 5-2) предоставляет более одного пути для протекания тока. Она позволяет источнику прикладывать напряжение к более чем одной нагрузке. Она также позволяет подключить

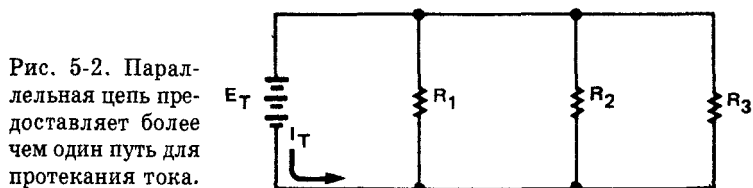


Рис. 5-2. Параллельная цепь предоставляет более чем один путь для протекания тока.

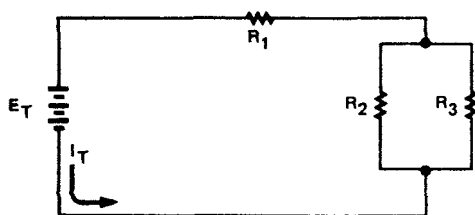


Рис. 5-3. Последовательно-параллельная цепь является комбинацией последовательной и параллельной цепей.

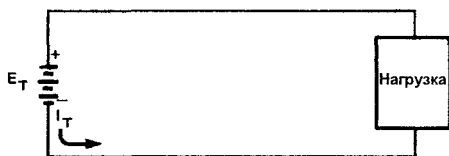


Рис. 5-4. Ток электронов течет по электрической цепи от отрицательного вывода источника тока через нагрузку и возвращается в источник тока через положительный вывод.

Рис. 5-5. Замкнутая цепь обеспечивает прохождение тока.

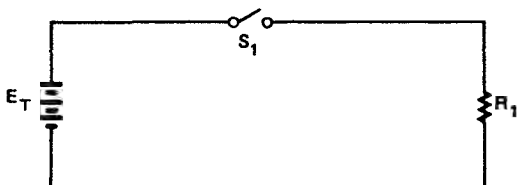
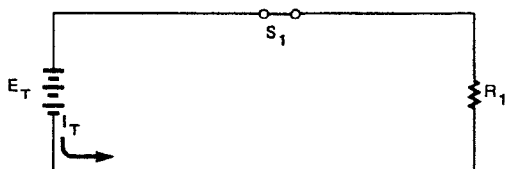


Рис. 5-6. Разомкнутая цепь не поддерживает прохождение тока.

несколько источников тока к одной нагрузке. Последовательно-параллельная цепь (рис. 5-3) является комбинацией последовательной и параллельной цепей.

Ток электронов в электрической цепи течет от отрицательного вывода источника тока через нагрузку к положительному выводу источника тока (рис. 5-4). Пока этот путь не нарушен, цепь замкнута и ток течет (рис. 5-5). Однако если прервать путь, цепь станет разомкнутой и ток не сможет по ней идти (рис. 5-6). Силу тока в электрической цепи можно изменять, изменяя либо приложенное напряжение, либо сопротивление цепи. Ток изменяется в таких же пропорциях, что и напряжение или сопротивление. Если напряжение увеличивается, то ток также увеличивается. Если напряжение уменьшается, то ток тоже уменьшается (рис. 5-7). С другой стороны, если сопротивление увеличивается, то ток уменьшается. Если сопротивление уменьшается, то ток увеличивается (рис. 5-8). Это соотношение меж-



Рис. 5-7. Силу тока в электрической цепи можно изменять путем изменения напряжения.



Рис. 5-8. Силу тока в электрической цепи также можно изменять путем изменения сопротивления цепи.

ду напряжением, силой тока и сопротивлением называется законом Ома.

5-1. Вопросы

1. Каковы три основные части электрической цепи?
2. Дайте определения:
 - а. Последовательной цепи
 - б. Параллельной цепи
 - в. Последовательно-параллельной цепи
3. Нарисуйте схему цепи, показывающую, как ток будет течь по цепи. (Используйте стрелки для указания направления тока).
4. В чем отличие разомкнутой цепи от замкнутой цепи?
5. Что происходит с током в электрической цепи при увеличении напряжения? При уменьшении напряжения? При увеличении сопротивления? При уменьшении сопротивления?

5-2. ЗАКОН ОМА

Закон Ома или соотношение между силой тока, напряжением и сопротивлением был открыт Георгом Омом в 1827 году. Закон Ома утверждает, что ток в электрической



кой цепи прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению цепи. Это может быть выражено следующим образом:

$$\text{ток} = \frac{\text{напряжение}}{\text{сопротивление}}$$

или

$$I = \frac{E}{R},$$

где I = ток в амперах,

E = напряжение в вольтах,

R = сопротивление в омах.

Если две из этих трех величин известны, то третья всегда может быть определена.

ПРИМЕР. Какова сила тока в цепи, изображенной на рис. 5-9 ?

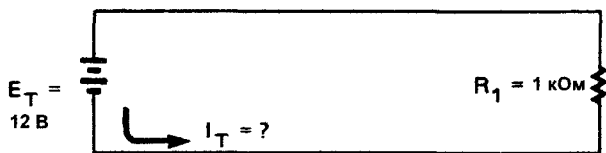


Рис. 5-9.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R_T = 1000 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{1000}$$

$$I_T = 0,012 \text{ А или } 12 \text{ мА.}$$

ПРИМЕР. Какое надо приложить напряжение к цепи на рис. 5-10, чтобы получить ток 20 миллиампер?

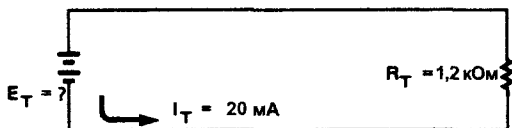


Рис. 5-10.

Дано:

$$I_T = 20 \text{ мА} = 0,02 \text{ А}$$

$$E_T = ?$$

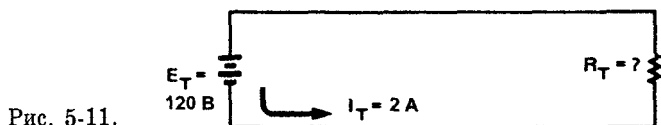
Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{E_T}{1200} = 0,02$$



$$R_T = 1,2 \text{ кОм} = E_T = (0,02)(1200) \\ = 1200 \text{ Ом.} \quad E_T = 24 \text{ В.}$$

ПРИМЕР. Каково должно быть значение сопротивления в цепи, изображенной на рис. 5-11, чтобы получить ток 2 А?



Дано:

$$I_T = 2 \text{ А}$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = ?$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T}$$

$$2 = \frac{120}{R_T}$$

$$\frac{120}{2} = R_T$$

$$R_T = 60 \text{ Ом.}$$

5-2. Вопросы

1. Запишите закон Ома в виде формулы.
2. Какова величина тока в цепи сопротивлением 2400 ом, к которой приложено напряжение 12 вольт?
3. Какова должна быть величина сопротивления для того, чтобы ограничить ток 20 миллиамперами при приложенном напряжении 24 вольт?
4. Какое напряжение необходимо приложить, чтобы обеспечить силу тока 3 ампера через сопротивление 100 ом?

5-3. ПРИМЕНЕНИЕ ЗАКОНА ОМА

В последовательной цепи (рис. 5-12) через всю цепь течет один и тот же ток.

$$I_T = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_3} = \dots = I_{R_n}.$$

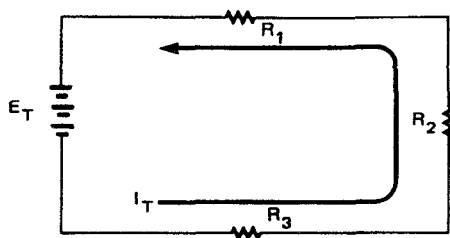


Рис. 5-12. В последовательной цепи сила тока одинакова во всей цепи.

Полное напряжение, приложенное к последовательной цепи, равно сумме падений напряжений на отдельных нагрузках (сопротивлениях) цепи.

$$E_T = E_{R_1} + E_{R_2} + E_{R_3} + \dots + E_{R_n}.$$

Общее сопротивление последовательной цепи равно сумме отдельных сопротивлений цепи.

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n.$$

В параллельной цепи (рис. 5-13) одинаковое напряжение прикладывается к каждой ветви цепи.

$$E_T = E_{R_1} = E_{R_2} = E_{R_3} = \dots = E_{R_n}.$$

Полный ток в параллельной цепи равен сумме токов отдельных ветвей цепи.

Величина обратная полному сопротивлению равна сумме обратных величин сопротивлений отдельных ветвей.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Общее сопротивление параллельной цепи всегда меньше, чем наименьшее из сопротивлений отдельных ветвей.

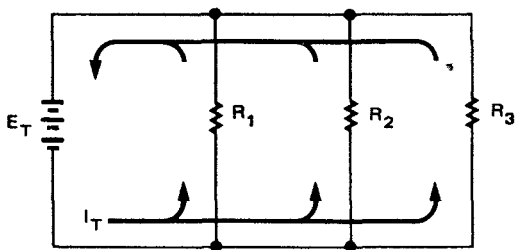


Рис. 5-13. В параллельной цепи токи делятся между ветвями цепи и складываются при возвращении в источник тока.



Закон Ома утверждает, что ток в цепи (последовательной, параллельной или последовательно-параллельной) прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению.

$$I = \frac{E}{R}.$$

При определении неизвестных величин в цепи, следуйте следующим правилам:

1. Нарисуйте схему цепи и обозначьте все известные величины.
2. Проведите расчеты для эквивалентных цепей и перерисуйте цепь.
3. Рассчитайте неизвестные величины.

Помните: закон Ома справедлив для любого участка цепи и может применяться в любой момент. По последовательной цепи течет один и тот же ток, а к любой ветви параллельной цепи приложено одинаковое напряжение.

ПРИМЕР. Чему равен полный ток в цепи, изображенной на рис. 5-14 ?

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 560 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 680 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 1 \text{ кОм} = 1000 \text{ Ом}.$$

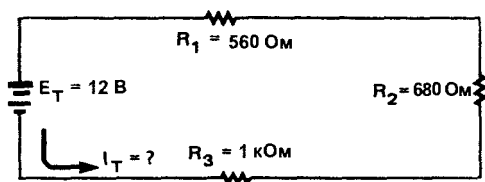


Рис. 5-14.

Решение:

Сначала вычислим общее сопротивление цепи:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_T = 560 + 680 + 1000 = 2240 \text{ Ом}.$$



Нарисуем эквивалентную цепь. См. рис. 5-15.



Рис. 5-15.

Теперь вычислим полный ток:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{2240}$$

$$I_T = 0,0054 \text{ А или } 5,4 \text{ мА.}$$

ПРИМЕР. Каково падение напряжения на резисторе R_2 в цепи, изображенной на рис. 5-16?

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 48 \text{ В}$$

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 1,2 \text{ кОм} = 1200 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3,9 \text{ кОм} = 3900 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 5,6 \text{ кОм} = 5600 \text{ Ом.}$$

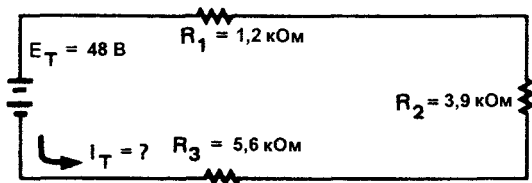


Рис. 5-16.

Решение:

Сначала вычислим общее сопротивление цепи:

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_T = 1200 + 3900 + 5600 = 10700 \text{ Ом.}$$

Нарисуем эквивалентную цепь. См. рис. 5-17.

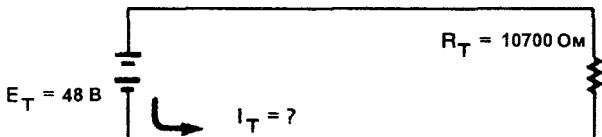


Рис. 5-17.

Теперь вычислим полный ток:



$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{48}{10700}$$

$$I_T = 0,0045 \text{ А или } 4,5 \text{ мА}$$

Вспомним, что в последовательной цепи один и тот же ток течет через всю цепь. Следовательно, $I_{R_2} = I_T$.

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$0,0045 = \frac{E_{R_2}}{3900}$$

$$E_2 = (0,0045)(3900)$$

$$E_2 = 17,55 \text{ В.}$$

ПРИМЕР. Чему равно значение R_2 в цепи, изображенной на рис. 5-18?

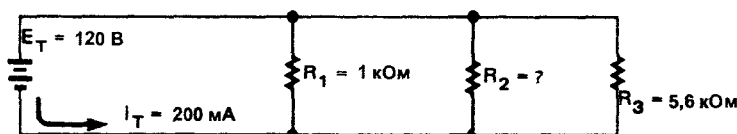


Рис. 5-18.

Сначала найдем ток, протекающий через R_1 и R_2 . Поскольку к каждой ветви параллельной цепи приложено одинаковое напряжение, напряжение на каждой ветви равно напряжению на источнике тока и равно 120 вольт.

Дано:

$$I_{R_1} = ?$$

$$E_{R_1} = 120 \text{ В}$$

$$R_1 = 1000 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1} = \frac{120}{1000}$$

$$I_{R_1} = 0,12 \text{ А.}$$

Дано:

$$I_{R_3} = ?$$

$$E_{R_3} = 120 \text{ В}$$

$$R_3 = 5600 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3}$$

$$I_{R_3} = 0,021 \text{ А.}$$



В параллельной цепи полный ток равен сумме токов в ветвях.

Дано:

$$I_T = 0,200 \text{ A}$$

$$I_{R_1} = 0,12 \text{ A}$$

$$I_{R_2} = ?$$

$$I_{R_3} = 0,021 \text{ A}$$

Решение:

$$I_T = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3}$$

$$0,200 = 0,12 + I_{R_2} + 0,021$$

$$0,200 = 0,141 + I_{R_2}$$

$$0,200 - 0,141 = I_{R_2}$$

$$0,059 \text{ A} = I_{R_2}.$$

Теперь с помощью закона Ома можно найти величину резистора R_2 .

Дано:

$$I_{R_2} = 0,059 \text{ A}$$

$$E_{R_2} = 120 \text{ В}$$

$$R_2 = ?$$

Решение:

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$0,059 = \frac{120}{R_2}$$

$$R_2 = \frac{120}{0,059}$$

$$R_2 = 2033,9 \text{ Ом}.$$

ПРИМЕР. Чему равен ток через резистор R_3 в цепи, изображенной на рис. 5-19 ?

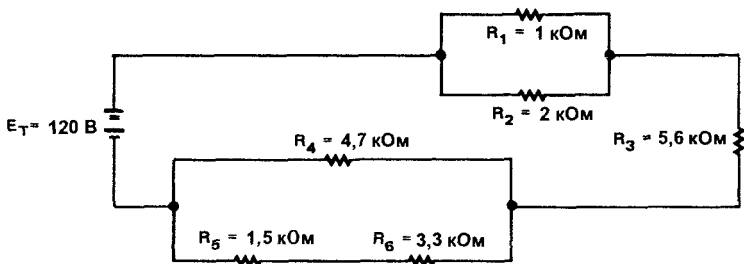


Рис. 5-19.

Сначала определим эквивалентное сопротивление (R_A) резисторов R_1 и R_2 .

Дано:

$$R_A = ?$$

$$R_1 = 1000 \text{ Ом}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$



$$R_2 = 2000 \text{ Ом.}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{2000}$$

$$R_A = \frac{2000}{3}$$

$$R_A = 666,67 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем эквивалентное сопротивление (R_B) резисторов R_4 , R_5 и R_6 . Сначала найдем общее сопротивление (R_S) последовательно соединенных резисторов R_5 и R_6 .

Дано:

$$R_S = ?$$

$$R_5 = 1500 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 3300 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_S = R_5 + R_6$$

$$R_S = 1500 + 3300 = 4800 \text{ Ом.}$$

Дано:

$$R_B = ?$$

$$R_4 = 4700 \text{ Ом}$$

$$R_S = 4800 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_S}$$

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{4700} + \frac{1}{4800}$$

(В этом случае общий знаменатель найти сложно. Будем использовать десятичные дроби.)

$$\frac{1}{R_B} = 0,000213 + 0,000208$$

$$R_B = \frac{1}{0,000421}$$

$$R_B = 2375,30 \text{ Ом.}$$

Нарисуем эквивалентную цепь, подставляя R_A и R_B , и найдем полное сопротивление последовательной эквивалентной цепи. См. рис. 5-20.

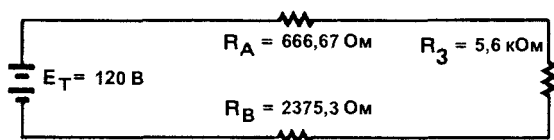


Рис. 5-20



Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_A = 666,67 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 5600 \text{ Ом}$$

$$R_B = 2375,30 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_T = R_A + R_3 + R_B$$

$$R_T = 666,67 + 5600 + 2375,30$$

$$R_T = 8641,97 \text{ Ом.}$$

Теперь с помощью закона Ома найдем общий ток в эквивалентной цепи.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = 8641,97 \text{ Ом. } I_T = 0,0139 \text{ А или } 13,9 \text{ мА.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{8641,97}$$

В последовательной цепи по всей цепи протекает одинаковый ток. Следовательно, ток, протекающий через R_3 , равен общему току в цепи.

$$I_{R_3} = I_T = 13,9 \text{ мА.}$$

5-3. Вопросы

1. Запишите формулы, необходимые для определения полного тока в последовательной и параллельной цепях, когда известны токи, протекающие через отдельные компоненты.
2. Запишите формулы, необходимые для определения полного напряжения в последовательной и параллельной цепях, когда известны падения напряжения на отдельных участках.
3. Запишите формулы для определения полного сопротивления последовательной и параллельной цепей, когда известны отдельные сопротивления.
4. Запишите формулы для вычисления полного тока, напряжения или сопротивления в последовательной или параллельной цепях, когда хотя бы две из трех величин (ток, напряжение и сопротивление) известны.



5. Чему равен общий ток в цепи, изображенной на рис. 5-21?

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R_1 = 500 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1200 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 2200 \text{ Ом.}$$

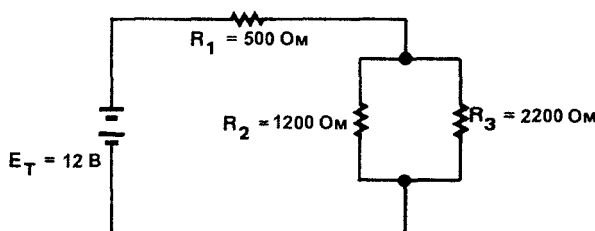


Рис. 5-21.

РЕЗЮМЕ

- Электрическая цепь состоит из источника тока, нагрузки и проводника.
- Путь тока в электрической цепи может быть последовательным, параллельным или последовательно-параллельным.
- Последовательная цепь предоставляет только один путь для протекания тока.
- Параллельная цепь предоставляет несколько путей для протекания тока.
- Последовательно-параллельная цепь обеспечивает комбинацию последовательных и параллельных путей для протекания тока.
- Ток электронов протекает от отрицательного вывода источника тока через нагрузку к положительному выводу источника тока.
- Протекающий в электрической цепи ток можно изменять путем изменения либо напряжения, либо сопротивления.
- Закон Ома связывает между собой силу тока, напряжение и сопротивление.



- Закон Ома утверждает, что сила тока в электрической цепи прямо пропорциональна приложенному напряжению и обратно пропорциональна сопротивлению цепи.

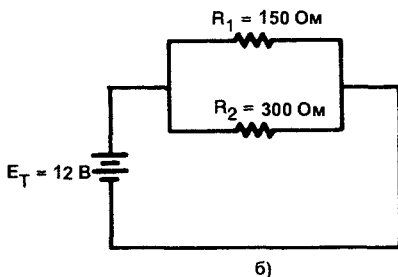
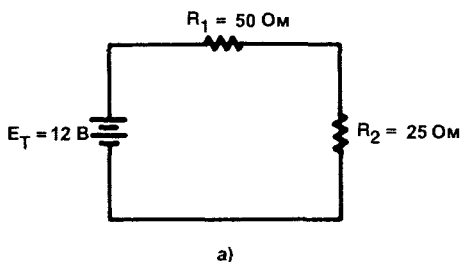
$$I = \frac{E}{R}.$$

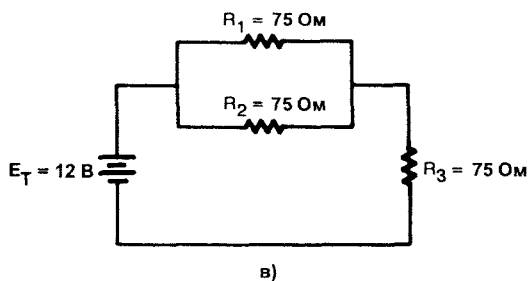
- Закон Ома применяется ко всем последовательным, параллельным и последовательно-параллельным цепям.
- Для определения неизвестных величин в цепи необходимо:
 - Нарисовать схему цепи и обозначить все величины.
 - Провести вычисления для эквивалентных цепей и перерисовать цепь.
 - Вычислить все неизвестные величины.

Глава 5. САМОПРОВЕРКА

С помощью закона Ома найдите неизвестные величины в следующих примерах:

1. $I = ?$ $E = 9 \text{ В}$ $R = 4500 \text{ Ом}$.
2. $I = 250 \text{ мА}$ $E = ?$ $R = 470 \text{ Ом}$.
3. $I = 10 \text{ А}$ $E = 240 \text{ В}$ $R = ?$
4. Найдите полный ток в изображенных цепях.





Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать типы измерительных приборов.
- Описать, как используется вольтметр в цепи.
- Описать, как используется амперметр в цепи.
- Описать, как используется омметр для измерения сопротивления.
- Точно прочесть отсчет со шкалы аналогового вольтметра.
- Точно прочесть отсчет со шкалы аналогового амперметра.
- Точно прочесть отсчет со шкалы аналогового омметра.
- Описать функции мультиметра.
- Описать, как используется мультиметр для измерения напряжения, тока и сопротивления.
- Описать, как измеряется ток с помощью амперметра.
- Описать, как подсоединяется амперметр к цепи.
- Перечислить меры предосторожности при использовании амперметра.
- Описать, как подсоединяется вольтметр к цепи.
- Перечислить меры предосторожности при подсоединении вольтметра к цепи.
- Описать, как измеряются значения сопротивлений с помощью омметра.
- Дать определение *проверки цепи на непрерывность*.
- Описать, как используется омметр для проверки разомкнутых, замкнутых и короткозамкнутых цепей.

В области электричества точные количественные измерения играют большую роль. Измеряют обычно такие параметры цепей, как ток, напряжение и сопротивление. Для проведения измерений используются амперметры, вольт-

метры и омметры. Для проведения электрических измерений важно хорошо понимать, как это делается.

В этой главе описаны широко используемые аналоговые измерительные приборы, включая мультиметры или многофункциональные измерительные приборы.

6-1. ВВЕДЕНИЕ

Измерительные приборы являются средством, с помощью которого невидимое действие электронов может быть зарегистрировано и измерено. Измерительные приборы необходимы при исследовании работы цепи. Существует два типа измерительных приборов. Первый — это **аналоговые приборы**, использующие проградуированную шкалу со стрелкой (рис. 6-1). Другой тип — **цифровые приборы**, показывающие величину отсчета показаний в виде цифр (рис. 6-2). Показания цифровых приборов легче читать, и они обеспечивают большую точность, чем аналоговые. Однако аналоговые приборы обеспечивают возможность проследить за быстрыми изменениями тока и напряжения.

Большинство измерительных приборов помещено в защитный корпус. Выводы предназначены для подсоединения приборов к цепи. Для правильного подсоединения прибора необходимо обратить внимание на полярность выводов. Цветной или белый выводы являются положительными, а черный вывод — отрицательным (или «землей»).

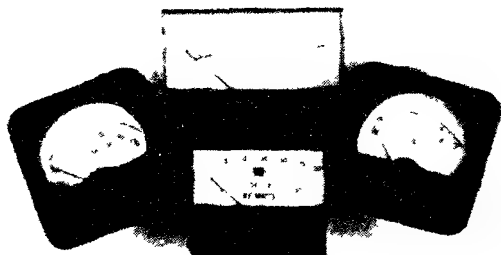


Рис. 6-1. Аналоговые измерительные приборы.



Рис. 6-2. Цифровой измерительный прибор.

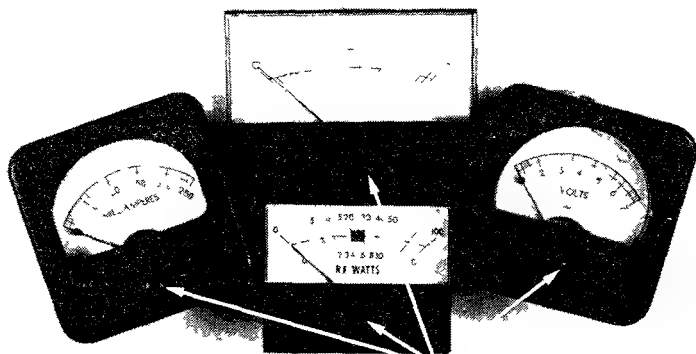


Рис. 6-3. Расположение винта коррекции нуля на различных аналоговых измерительных приборах.

Перед использованием аналогового прибора его стрелка должна быть установлена на ноль. На лицевой стороне любого прибора находится маленький винт, с помощью которого производится установка на ноль (рис. 6-3). Установив стрелку на ноль, разместите прибор там, где он дол-



жен использоваться. Если стрелка не стоит на нуле, используйте для поворота винта отвертку. Прибор не должен подключаться к цепи до тех пор, пока не проведена установка стрелки на ноль.

6-1. Вопросы

1. Для чего предназначены измерительные приборы?
2. Какие два типа измерительных приборов существуют?
3. Какими цветами обозначены положительный и отрицательный выводы у измерительного прибора?
4. Какая регулировка должна быть сделана перед использованием аналогового измерительного прибора?

6-2. ТИПЫ ИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Амперметр используется для измерения тока в цепи. *Амперметр* (схематическое обозначение показано на рис. 6-4) может рассматриваться как измеритель потока электронов. Он измеряет количество электронов, протекающих через данную точку цепи. Для получения показаний прибора, электроны должны течь через амперметр. Как показано на рис. 6-5, для этого надо разомкнуть цепь и вставить туда амперметр. Включение в цепь амперметра не должно изменять величину протекающего там тока, поэтому сопротивление амперметра должно быть мало.

Вольтметр используется для измерения напряжения (разности потенциалов) между двумя точками цепи. Вольтметр подключается параллельно участку, на котором

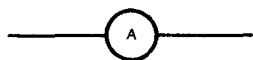


Рис. 6-4. Схематическое обозначение амперметра.

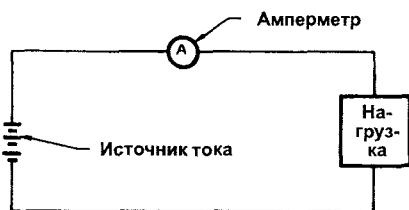


Рис. 6-5. Размещение амперметра в цепи.

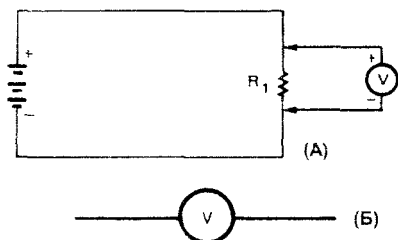


Рис. 6-6. (А) Вольтметр подсоединяется к цепи параллельно. (Б) Схематическое обозначение вольтметра.

измеряется падение напряжения, сопротивление его должно быть велико (рис. 6-6).

Сопротивление измеряется с помощью **омметра**. Для измерения сопротивления к измеряемому устройству прикладывается некоторое напряжение, индуцирующее ток

через это устройство (рис. 6-7). Когда сопротивление мало, течет большой ток, и омметр регистрирует низкое сопротивление. Когда сопротивление велико, течет маленький ток, и омметр регистрирует высокое сопротивление.

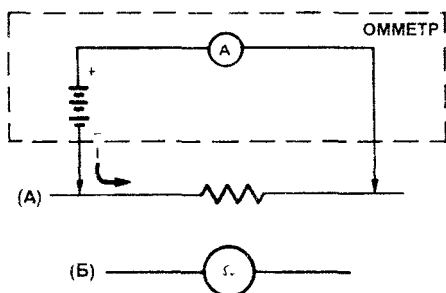


Рис. 6-7. (А) Омметр прикладывает напряжение к измеряемой компоненте и измеряет текущий через нее ток. (Б) Схематическое обозначение омметра.

6-2. Вопросы

1. Каким прибором измеряют ток?
2. Какой прибор предназначен для измерения напряжения?
3. Какой измерительный прибор используется для измерения сопротивления?
4. Опишите, как измерять ток с помощью амперметра?
5. Опишите, как измерять напряжение с помощью вольтметра?
6. Опишите, как измерять сопротивление с помощью омметра?

6-3. ИЗМЕРЕНИЕ ТОКА

Для того чтобы использовать амперметр для измерения тока, цепь должна быть разомкнута, а измерительный прибор вставлен последовательно в цепь (рис. 6-8).

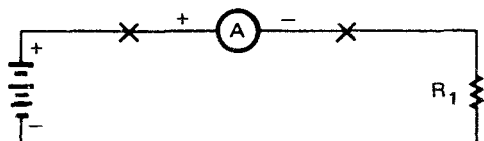


Рис. 6-8. Амперметр включается в цепь последовательно.

При включении амперметра в цепь должна соблюдаться полярность. Два вывода на амперметре помечены: положительный — красным, а отрицательный (общий) — черным (рис. 6-9).

Предостережение: всегда отключайте источник питания перед подключением амперметра к цепи.

Отрицательный вывод должен быть подключен к более отрицательной (с меньшим потенциалом) точке цепи, а положительный вывод к более положительной (с большим

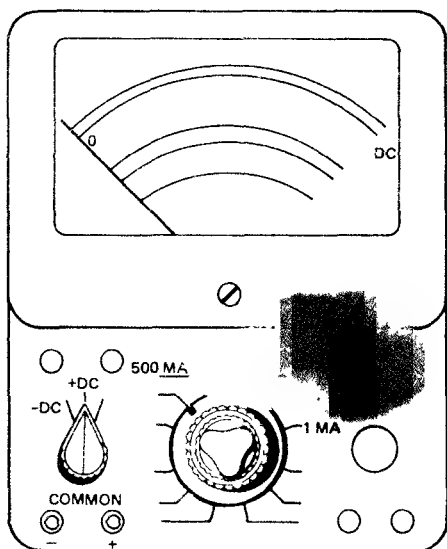


Рис. 6-9. Амперметр является только частью этого измерительного прибора. Черный отрицательный провод подключается в общее или отрицательное гнездо. Положительный провод подключается в гнездо со знаком плюс.

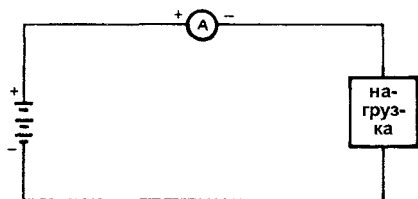


Рис. 6-10. Подсоедините положительный вывод амперметра к более положительной точке цепи (к точке с большим потенциалом). Подсоедините отрицательный вывод амперметра к более отрицательной точке цепи (к точке с меньшим потенциалом).

потенциалом) точке цепи (рис. 6-10). После подсоединения амперметра, его стрелка переместится слева направо. Если стрелка перемещается в противоположном направлении, поменяйте выводы местами.

Предостережение: Амперметр никогда не должен подключаться параллельно какому-либо элементу цепи. Если его подсоединить параллельно, то перемычка в приборе расплавится и серьезно повредит прибор или цепь. Никогда не подключайте амперметр непосредственно к источнику тока.

После установки амперметра в цепь и перед включением питания установите прибор на наивысший предел измерения. После включения питания шкалу амперметра можно переключить на наиболее подходящую. Это предотвратит резкое движение стрелки прибора вправо до упора.

Внутреннее сопротивление амперметра прибавляется к сопротивлению цепи и увеличивает общее сопротивление цепи. Измеренный ток в цепи может быть ниже, чем ток, текущий в отсутствие амперметра. Однако поскольку сопротивление амперметра мало по сравнению с сопротивлением цепи, ошибкой можно пренебречь.

Амперметр с зажимами (измерительные клещи) не требует подсоединения к измеряемой цепи. Амперметр с зажимами использует электромагнитное поле, создаваемое током для измерения величины тока в цепи.

6-3. Вопросы

1. Как амперметр подсоединяется к цепи?



2. Что надо сделать перед подсоединением амперметра к цепи?
3. Что надо сделать, если стрелка отклоняется в обратном направлении?
4. Какую шкалу амперметра надо выбрать перед включением питания?

6-4. ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Напряжение существует между двумя точками, оно не течет через цепь подобно току. Следовательно, вольтметр, используемый для измерения напряжения, подсоединяется параллельно цепи.

Предостережение: если вольтметр включить в цепь последовательно, через него может пойти большой ток и повредить его.

Здесь также важна полярность. Отрицательный вывод вольтметра должен быть подсоединен к более отрицательной точке цепи (с меньшим потенциалом), а положительный вывод — к более положительной точке цепи (с большим потенциалом) (рис. 6-11). Если точки соединения поменять местами, стрелка прибора отклонится влево, и измерение нельзя будет провести. Если это случится, поменяйте местами выводы.

Для проведения измерений необходимо сначала отключить питание цепи, подсоединить вольтметр, а затем снова включить питание. Сначала установите наивысший предел измерения вольтметра. После того как к цепи будет

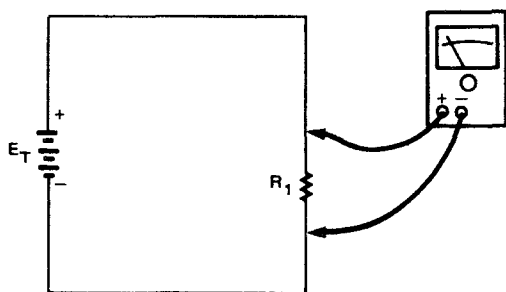


Рис. 6-11. При подключении вольтметра к цепи убедитесь в правильном выборе полярности.



приложено напряжение, установите наиболее подходящую измерительную шкалу прибора.

Внутреннее сопротивление вольтметра подключено параллельно к измеряемому элементу цепи. Общее сопротивление параллельно включенных резисторов всегда меньше, чем сопротивление наименьшего резистора. В результате напряжение, которое показывает вольтметр, меньше, чем реальное напряжение в отсутствие вольтметра. В большинстве случаев внутреннее сопротивление вольтметра достаточно высокое и ошибка настолько мала, что ею можно пренебречь. Однако если напряжение измеряется в цепи с высоким сопротивлением, сопротивление измерительного прибора может давать заметный эффект. Некоторые вольтметры, предназначенные для таких целей, имеют сверхвысокое внутреннее сопротивление.

6-4. Вопросы

1. Как вольтметр подсоединяется к цепи?
2. Что рекомендует практика при подсоединении вольтметра к цепи?
3. Что надо сделать, если стрелка вольтметра отклоняется влево?
4. Какое предостережение необходимо учесть при проведении измерений в цепи с высоким сопротивлением?

6-5. ИЗМЕРЕНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ

Омметр измеряет сопротивление цепи или компоненты цепи с помощью приложенного известного напряжения. Напряжение обеспечивают батареи. Когда к измерительному прибору через исследуемую компоненту прикладывается постоянное напряжение, стрелка прибора отклоняется в соответствии с протекающим током. Отклонение стрелки различно для различных измеряемых сопротивлений. Для того, чтобы измерить сопротивление цепи или ее составляющей, омметр подсоединяется параллельно цепи или ее какой-либо компоненте.

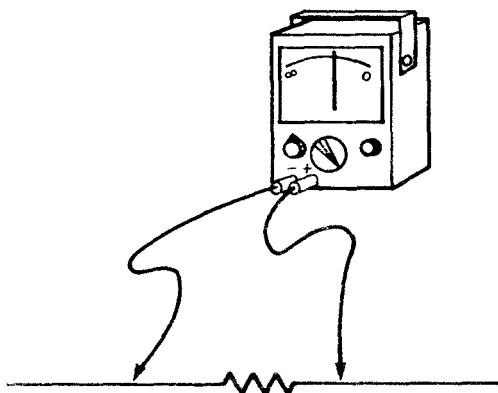


Рис. 6-12. При использовании омметра для измерения сопротивления измеряемая компонента должна быть удалена из цепи.

Предостережение: Перед подсоединением омметра к цепи, убедитесь, что питание выключено.

Когда измеряется сопротивление компоненты в цепи, отсоедините один конец компоненты от цепи. Это устраняет параллельные пути, которые могут привести к неправильному измерению сопротивления. Для получения точного измерения устройство должно быть удалено из цепи. После этого выводы омметра подсоединяются к устройству (рис. 6-12).

Главное назначение омметра — измерение сопротивления. Следовательно, омметр может быть использован для определения, какой является цепь: разомкнутой, замкнутой или замкнутой. **Разомкнутая цепь** имеет бесконечно большое сопротивление, поскольку через нее не течет ток (рис. 6-13). **Короткозамкнутая цепь** имеет нулевое сопротивление, так как ток, проходя через нее, не вызывает падения напряжения. **Замкнутая цепь** представляет собой полный путь для прохождения тока. Ее сопротивление зависит от сопротивлений компонентов цепи (рис. 6-14).

Проверка цепи на замкнутость, разомкнутость или замкнутость называется **проверкой цепи на непрерывность**. Эта проверка показывает, является ли путь для тока непрерывным. Для того, чтобы определить замкнута цепь или разомкнута, должна быть использована наименьшая чувствительность шкалы омметра. Сначала убедитесь в том, что в цепи отсутствуют компоненты, которые могут

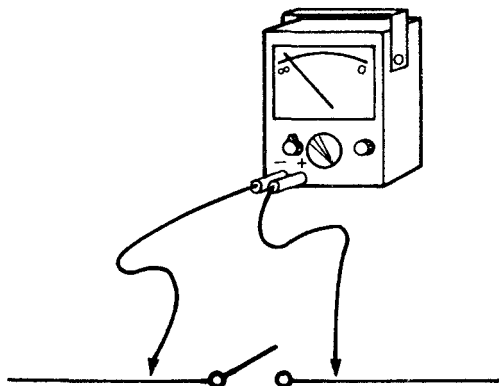
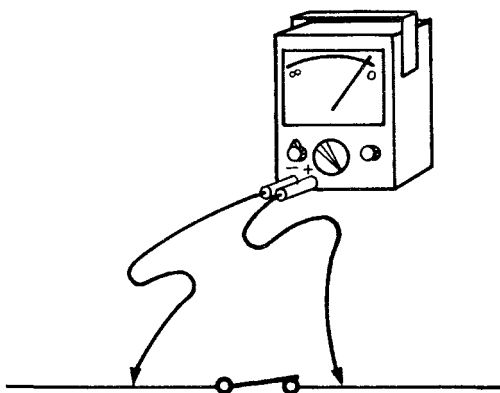


Рис. 6-13 Омметр может использоваться для определения разрыва в цепи. Разомкнутая цепь показывает высокое сопротивление.

Рис. 6-14. Омметр может также использоваться, чтобы определить, допускает ли цепь прохождение тока. Замкнутая цепь показывает низкое сопротивление.



быть повреждены током от омметра. После этого подсоедините выводы омметра к точкам измеряемой цепи. Если омметр что-то показывает, то цепь замкнута или короточена. Если омметр ничего не показывает (стрелка не отклоняется) — цепь разомкнута. Эта проверка полезна для установления причины, по которой цепь не работает.

6-5. Вопросы

1. Как работает омметр?
2. Какое предостережение необходимо вспомнить перед подсоединением омметра к цепи?



3. Что является основным предназначением омметра?
4. Для каких других целей может использоваться омметр?

6-6. ОТСЧЕТ ПОКАЗАНИЙ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО ПРИБОРА

Отсчет показаний амперметра и вольтметра производится одинаково, хотя вольтметры измеряют вольты, а амперметры — амперы.

Максимальное значение, показываемое измерительным прибором, называется **пределом измерения**. Другими словами, это максимальное значение тока или напряжения, которое может определить измерительный прибор при отклонении стрелки на всю шкалу.

Измеренное значение тока или напряжения отсчитывается по шкале с помощью стрелки. Например, стрелка на рис. 6-15 отклонилась на одно большое деление, показывая напряжение 1 вольт или ток 1 ампер. На измерительном приборе (рис. 6-16), стрелка отклонилась на семь больших делений, показывая ток 7 ампер или напряжение 7 вольт.

Если стрелка измерительного прибора расположена между большими делениями шкалы, надо учитывать маленькие деления. Рис. 6-17 показывает четыре маленьких деления между каждыми большими делениями на шкале,

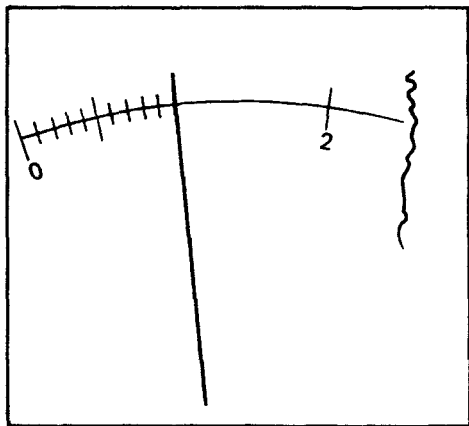


Рис. 6-15 Отсчет показываает 1 вольт или ампер.

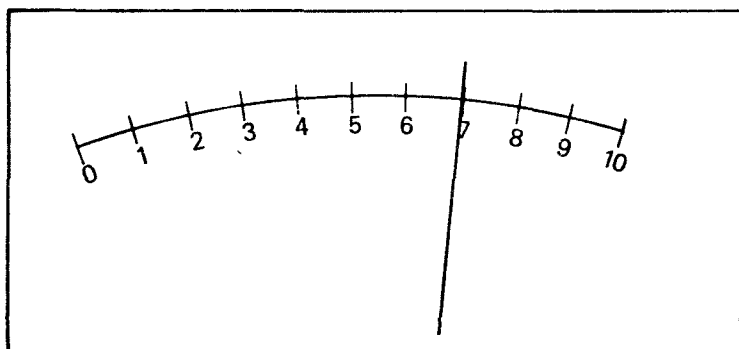


Рис. 6-16. Отсчет показывает 7 вольт или ампер.

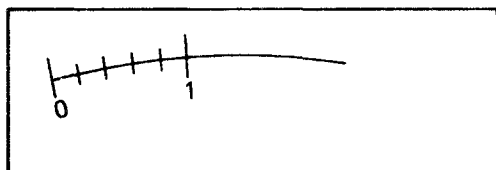


Рис. 6-17. Каждое малое деление составляет 0,2 вольта или ампера.

создавая пять равных интервалов. Каждый из этих маленьких интервалов составляет одну пятую главного деления, или 0,2 единицы измерения.

Если стрелка находится между малыми делениями шкалы прибора, то ее показание должно быть оценено. На рис. 6-18 стрелка находится между отметками $2/5(0,4)$ и $3/5(0,6)$. Это означает примерно 2,5 вольта или ампера. На рис. 6-19 стрелка находится на одной четвертой расстояния между отметками $3/5(0,6)$ и $4/5(0,8)$. Каждый маленький интервал составляет 0,2. Одна четвертая от 0,2 составляет 0,05. Следовательно, стрелка показывает примерно 4,65 вольта или ампера.

Количество больших и малых делений на шкале измерительного прибора зависит от диапазона напряжений или токов, на которые рассчитан прибор. Во всех случаях цена наименьшего интервала может быть найдена путем деления цены большого интервала на число содержащихся в нем делений.

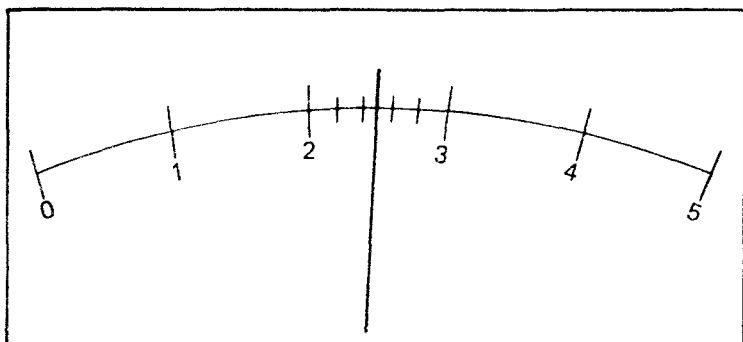


Рис. 6-18 Отсчет показывает 2,5 вольта или ампера.

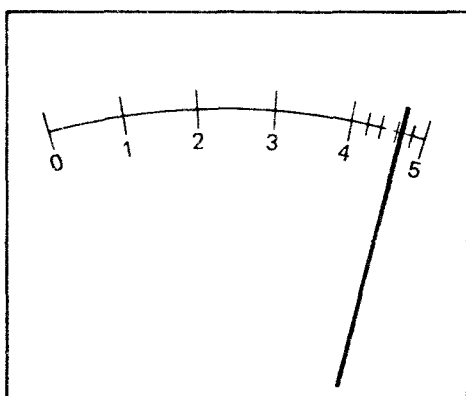


Рис. 6-19. Отсчет показывает 4,65 вольта или ампера.

Шкала измерительного прибора для измерения сопротивлений отличается от шкал для измерения токов и напряжений (рис. 6-20). Она читается справа налево, а не слева направо. Кроме того, эта шкала является нелинейной, поэтому количество малых делений между большими делениями не одинаково в разных местах шкалы. Между 0 и 1 имеется пять малых делений, каждое из которых равно 0,2 единицы измерения. Между 6 и 10 имеется 4 интервала, каждый из которых равен 1 единице, а внутри каждого интервала есть еще деление, составляющее 0,5 единицы. Между отметками 50 и 100 имеется пять малых интервалов, каждый из которых составляет 10 единиц. Между 100 и 500 имеется четыре малых интервала, каждый

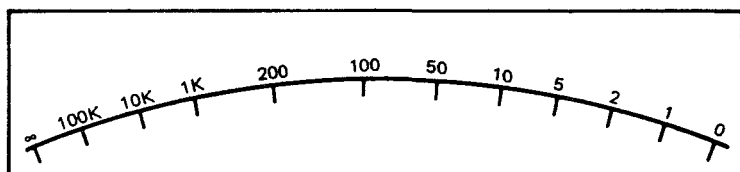


Рис 6-20. Шкала омметра читается справа налево

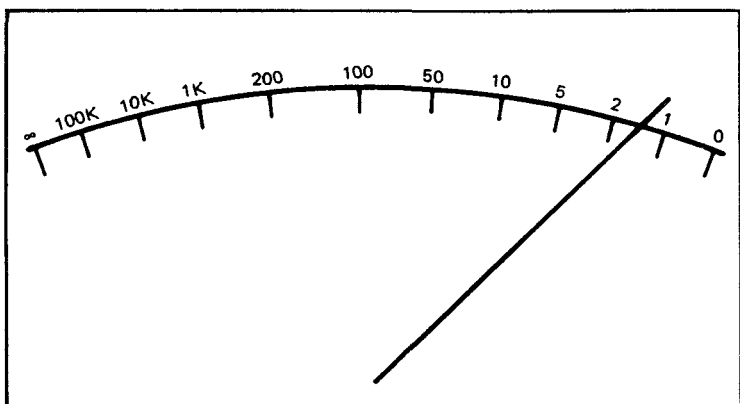


Рис. 6-21. Отсчет показывает 1,5 ома.

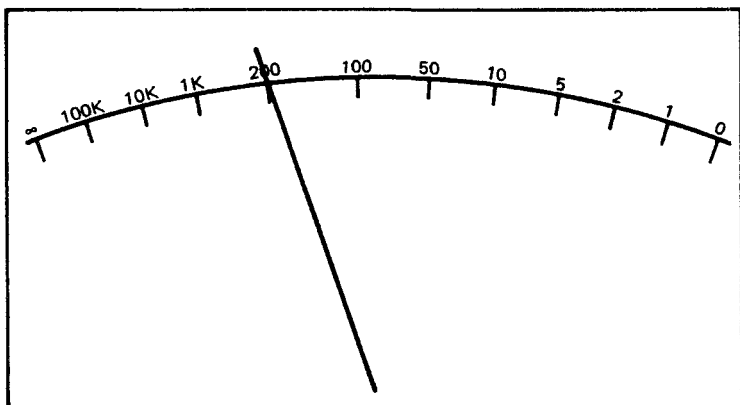


Рис. 6-22. Отсчет показывает 200 ом.



из которых составляет 100 единиц, причем первый из них разделен на два интервала по 50 единиц. Последней отметкой слева является бесконечность (∞). Если стрелка указывает на эту отметку, то измеряемое сопротивление лежит за пределами измерений прибора. В нормальных условиях, когда сопротивление не измеряется, стрелка находится на отметке бесконечность. На рис. 6-21 показано отклонение стрелки на 1,5 ома. На рис. 6-22 изображена стрелка, показывающая 200 ом.

Перед использованием омметра его измерительные провода соединяются накоротко и с помощью регулятора установки нуля стрелка устанавливается на нулевую отметку. Эта операция проверяет прибор и компенсирует старение батареи.

6-6. Вопросы

1. Что определяет максимальное значение, которое может измерять аналоговый измерительный прибор?
2. В чем отличие между шкалой омметра и шкалой амперметра или вольтметра?
3. Оцените показания шкалы вольтметра на рис. 6-23.

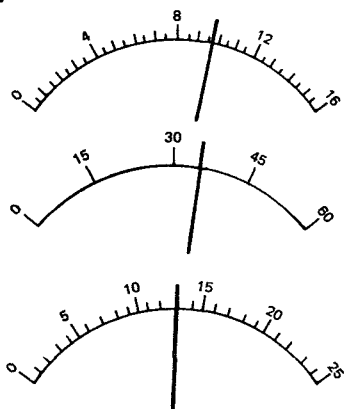


Рис. 6-23.

6-7. МУЛЬТИМЕТРЫ

При работе с блоками оборудования должны быть проведены различные измерения. Для того чтобы не использовать несколько измерительных приборов, вольтметр, амперметр и омметр могут быть объединены в один инструмент, который называется **мультиметр**. Мультиметр также называют *авометр* (*ампер вольт омметр*), рис. 6-24.

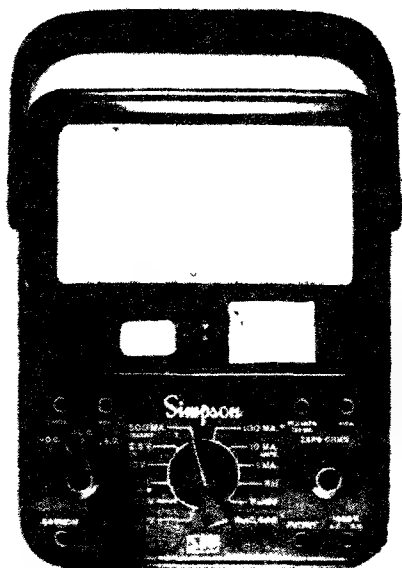


Рис. 6-24. Аналоговый мультиметр.

Измерительный прибор на рис. 6-24 имеет пять пределов измерения по напряжению, четыре измерения предела по току и три предела измерения по сопротивлению. Прибор содержит пять шкал для удобства пользования им при измерении различных величин на различных пределах. Специалист выбирает с помощью переключателя мультиметра желаемый предел измерения по напряжению, току или сопротивлению. Регулятор установки нуля позволяет ометру компенсировать изменения напряжения внутренних батарей. Переключатель функций прибора имеет три положения: DC (– постоянный ток), + DC (– постоянный ток) и AC (переменный ток). Для измерения постоянного тока, постоянного напряжения и сопротивления переключатель надо поставить на –DC или +DC, в зависимости от полярности измеряемого тока или напряжения. Этот переключатель допускает перемену полярности без отсоединения измерительных проводов от цепи.

Для измерения постоянного напряжения установите переключатель в положение +DC. Когда переключатель установлен на -DC, общий щуп является отрицательным, а положительный щуп — положительным. Вольтметр подсоединяется параллельно цепи. При измерении неизвестного напряжения всегда выбирайте наивысший предел измерения (500 вольт). Если измеряемое напряжение ниже, можно выбрать более низкий предел. Эта процедура защищает измерительный прибор от повреждения. Сделайте отсчет напряжения на шкале, отмеченной DC. Для предела 2,5 вольта используйте шкалу 0-250 и поделите отсчет на 100. Для пределов 10, 50 и 250 вольт используйте соответствующие шкалы. Для предела 500 вольт используйте шкалу 0-50 и умножьте отсчет на 10.

Для измерения тока установите переключатель на желаемый предел по току и включайте прибор в цепь последовательно. Используйте шкалу DC. Для предела 1 мА используйте шкалу 0-10 и поделите отсчет на 10. Для предела 10 мА используйте шкалу 0-10 непосредственно. Для предела 100 мА используйте шкалу 0-10 и умножьте отсчет на 10. Для предела 500 мА используйте шкалу 0-50 и умножьте отсчет на 10.

Для измерения сопротивления установите переключатель на желаемый предел измерения сопротивления. Закоротите измерительные провода. Вращайте регулятор установки нуля до тех пор, пока стрелка не установится на нуль. Разомкните измерительные провода и подсоедините их к измеряемой компоненте. Используйте предел $R \times 1$ для измерения сопротивлений от 0 до 200 ом. Используйте предел $R \times 100$ для измерения сопротивлений от 200 до 20000 ом. Используйте предел $R \times 10000$ для измерения сопротивлений больших 20000 ом. Делайте отсчет на шкале омов в верхней части шкалы прибора. Запомним, что шкала омов читается справа налево. Для того чтобы определить действительное значение сопротивления, умножьте отсчет на множитель выбранного предела. Константа K равна 1000.



Для использования других гнезд для напряжения и тока, расположенных на мультиметре, обратитесь к руководству по эксплуатации.

6-7. Вопросы

1. Что такое мультиметр?
2. Опишите, как провести измерение напряжения с помощью мультиметра?
3. Опишите, как провести измерение тока с помощью мультиметра?
4. Объясните, как использовать омметр в мультиметре?
5. Какие предосторожности должны соблюдаться при использовании мультиметра?

РЕЗЮМЕ

- Аналоговые измерительные приборы используют градуированную шкалу со стрелкой.
- Цифровые измерительные приборы обеспечивают непосредственный отсчет.
- Как в аналоговых, так и в цифровых измерительных приборах цветной или белый вывод являются положительными, а черный вывод — отрицательным.
- Перед использованием аналогового измерительного прибора установите стрелку прибора на нуль.
- Амперметр включается в цепь последовательно.
- Вольтметр подсоединяется к цепи параллельно.
- Омметр измеряет сопротивление путем пропускания небольшого тока через измеряемое сопротивление.
- Максимальное значение шкалы измерительного прибора называется пределом измерения.
- Количество делений на шкале измерительного прибора зависит от диапазона измеряемых величин.
- Шкала амперметров и вольтметров читается слева направо и является линейной.



- Шкала омметра читается справа налево и является нелинейной.
- Аналоговый омметр перед использованием необходимо откалибровать для компенсации старения батареи.
- Мультиметр сочетает в себе вольтметр, амперметр и омметр в одном корпусе.
- Авометр — это мультиметр, который измеряет вольты, омы и миллиамперы.
- Переключатель пределов измерений мультиметра переключает также и функции прибора.

Глава 6. САМОПРОВЕРКА

1. Какой тип прибора, аналоговый или цифровой, вы бы использовали для точных измерений?
2. Какой тип прибора, аналоговый или цифровой, вы бы использовали для регистрации быстрых изменений тока или напряжения?
3. Нарисуйте шкалу измерительного прибора и покажите, где должна быть стрелка для следующих показаний.
 - а. 23 В;
 - б. 220 мА;
 - в. 2700 Ом.
4. В чем преимущества использования мультиметра?

Глава 7. МОЩНОСТЬ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Дать определение *мощности*, связанной с электрической цепью.
- Записать связь мощности с током и напряжением.
- Вычислить мощность, потребляемую электрической цепью.
- Дать определение полной мощности, потребляемой последовательной, параллельной или последовательно-параллельной цепью.

Кроме силы тока, напряжения и сопротивления, существует четвертая величина, играющая важную роль при анализе электрических цепей. Эта величина называется мощностью.

Мощность — это скорость, с которой совершается работа. Мощность расходуется только при подключении цепи к источнику. Мощность прямо пропорциональна и току, и напряжению.

В этой главе анализируются процессы в электрических цепях с учетом мощности.

7-1. МОЩНОСТЬ

Скорость, с которой энергия передается в цепь, или энергия (тепло) выделяется на сопротивлении в цепи, называется **мощностью**. Мощность измеряется в ваттах. **Ватт** — это произведение напряжения в 1 вольт и тока в 1 ампер. Соотношение между мощностью, напряжением и током может быть записано следующим образом:

$$P = IE,$$

где P = мощность в ваттах, I = ток в амперах, E = напряжение в вольтах.

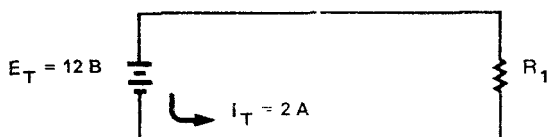


Рис. 7-1.

ПРИМЕР: Вычислите мощность потребляемую в цепи, изображенной на рис. 7-1.

Дано:

$$P = ?$$

$$I = 2 \text{ A}$$

$$E = 12 \text{ В.}$$

Решение:

$$P = IE$$

$$P = (2)(12)$$

$$P = 24 \text{ Вт.}$$

ПРИМЕР: Какое требуется напряжение для того, чтобы получить ток в 2 ампера при мощности 200 ватт?

Дано:

$$P = 200 \text{ Вт}$$

$$I = 2 \text{ A}$$

$$E = ?$$

Решение:

$$P = IE$$

$$200 = 2(E)$$

$$E = 100 \text{ В.}$$

ПРИМЕР: Какой ток течет через 100 ваттную лампочку при напряжении 120 вольт?

Дано:

$$P = 100 \text{ Вт}$$

$$I = ?$$

$$E = 120 \text{ В.}$$

Решение:

$$P = IE$$

$$100 = (I)(120)$$

$$I = 0,83 \text{ A.}$$

7-1. Вопросы

1. Дайте определение электрической мощности.
2. Какие единицы используются для измерения мощности?
3. Вычислите неизвестные величины:
 - a. $P = ?$, $E = 12 \text{ В}$, $I = 1 \text{ A}$.
 - b. $P = 1000 \text{ Вт}$, $E = ?$, $I = 10 \text{ A}$.
 - c. $P = 150 \text{ Вт}$, $E = 120 \text{ В}$, $I = ?$



7-2. ПРИМЕНЕНИЕ МОЩНОСТИ (АНАЛИЗ ЦЕПЕЙ)

Резистивные элементы цепи потребляют мощность. Для определения мощности, потребляемой элементом цепи, надо умножить падение напряжения на этом элементе на ток, протекающий через него:

$$P = IE.$$

Полная мощность, потребляемая последовательной или параллельной цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными элементами. Это может быть выражено следующим образом:

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \dots + P_{R_n}.$$

Мощность, потребляемая цепью, часто бывает меньше 1 ватта. Для облегчения использования таких малых чисел используются милливатт (мВт) и микроватт (мкВт).

$$1000 \text{ милливатт} = 1 \text{ ватт};$$

$$1 \text{ милливатт} = \frac{1}{1000} \text{ ватта};$$

$$1000000 \text{ микроватт} = 1 \text{ ватт};$$

$$1 \text{ микроватт} = \frac{1}{1000000} \text{ ватта}.$$

ПРИМЕР: какая мощность потребляется в цепи, изображенной на рис. 7-2?

Сначала определим полное сопротивление цепи.

Дано:

Решение:

$$R_T = ?$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R_1 = 560 \text{ Ом}$$

$$R_T = 560 + 820 + 1000$$

$$R_2 = 820 \text{ Ом}$$

$$R_T = 2380 \text{ Ом}.$$

$$R_3 = 1000 \text{ Ом}.$$

Теперь, используя закон Ома, определим полный ток, текущий по цепи.

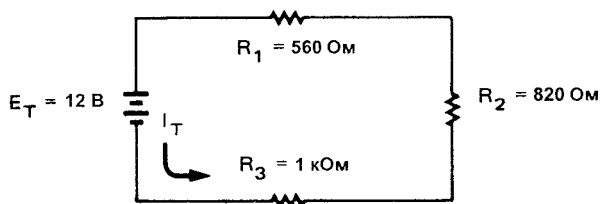


Рис. 7-2.

Дано:

$$I = ?$$

$$E = 12 \text{ В}$$

$$R = 2380 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{2380}$$

$$I = 0,005 \text{ А.}$$

Общую потребляемую мощность теперь можно определить с помощью формулы для мощности.

Дано:

$$P_T = ?$$

$$I_T = 0,005 \text{ А}$$

$$E_T = 12 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,005)(12)$$

$$P_T = 0,06 \text{ Вт или } 60 \text{ мВт.}$$

ПРИМЕР: Каково сопротивление резистора R_2 в цепи, изображенной на рис. 7-3 ?

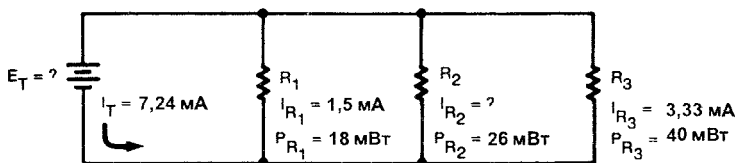


Рис. 7 3.

Сначала определим падение напряжения на резисторе R_1 . В параллельной цепи ко всем ветвям приложено одинаковое напряжение.

Дано:

$$P_{R_1} = 0,018 \text{ Вт}$$

$$I_{R_1} = 0,0015 \text{ А}$$

$$E_{R_1} = ?$$

Решение:

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$0,018 = (0,0015)(E_{R_1})$$

$$E_{R_1} = 12 \text{ В.}$$

Теперь можно определить ток через резистор R_2 .

Дано:

$$P_{R_2} = 0,026 \text{ Вт}$$

$$I_{R_2} = ?$$

$$E_{R_2} = 12 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$0,026 = (I_{R_2})(12)$$

$$I_{R_2} = 0,00217 \text{ А.}$$

Теперь можно определить сопротивление резистора R_2 с помощью закона Ома.

Дано:

$$I_{R_2} = 0,00217 \text{ А}$$

$$E_{R_2} = 12 \text{ В}$$

$$R_2 = ?$$

Решение:

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$0,00217 = \frac{12}{R_2}$$

$$R_2 = 5530 \text{ Ом.}$$

ПРИМЕР: Какая мощность выделяется на резисторе 22 ома, если через него течет ток 0,05 ампера?

Сначала нужно определить с помощью закона Ома падение напряжения на резисторе.

Дано:

$$I_R = 0,05 \text{ А}$$

$$E_R = ?$$

$$R = 22 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_R = \frac{E_R}{R}$$

$$0,05 = \frac{E_R}{22}$$

$$E_R = 1,1 \text{ В.}$$

Теперь можно определить мощность, выделяемую на резисторе с помощью формулы для мощности.

Дано:

$$P_R = ?$$

$$E_R = 1,1 \text{ В}$$

$$I_R = 0,05 \text{ А.}$$

Решение:

$$P_R = I_R E_R$$

$$P_R = (0,05)(1,1)$$

$$P_R = 0,055 \text{ Вт или } 55 \text{ мВт.}$$

7-2. Вопросы

1. По какой формуле можно определить мощность, если известны ток и напряжение?
2. По какой формуле определяют полную мощность последовательной цепи? Параллельной цепи?

3. Преобразуйте следующие единицы:
- 100 мВт = ____ мкВт;
 - 10 Вт = ____ мВт;
 - 10 мкВт = ____ Вт;
 - 1000 мкВт = ____ мВт
 - 0,025 Вт = ____ мВт.
4. Какая мощность выделяется на каждом резисторе в цепи, изображенной на рис. 7-4?

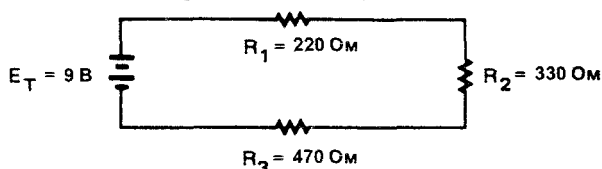


Рис. 7-4.

5. Какая мощность выделяется на каждом резисторе в цепи, изображенной на рис. 7-5?

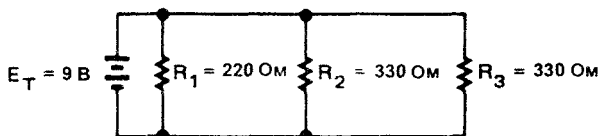


Рис. 7-5.

6. Какая мощность выделяется на каждом резисторе в цепи, изображенной на рис. 7-6?

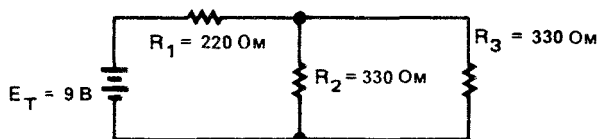


Рис. 7-6.

РЕЗЮМЕ

- Мощность — это скорость, с которой энергия подается в цепь.
- Мощность — это также скорость, с которой энергия (тепло) выделяется на сопротивлении в цепи.
- Мощность измеряется в ваттах.
- Мощность равна произведению тока на напряжение:

$$P = IE.$$



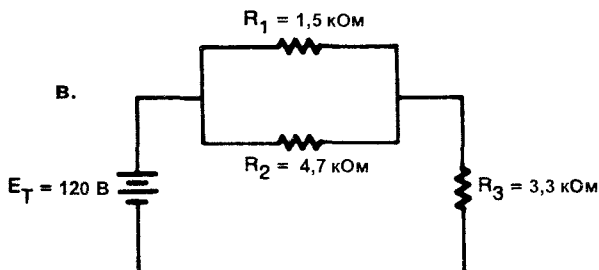
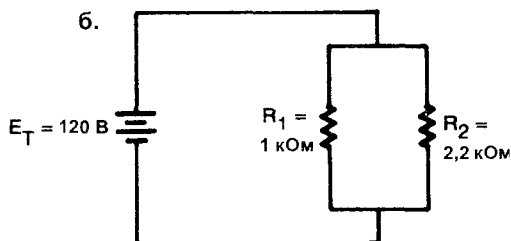
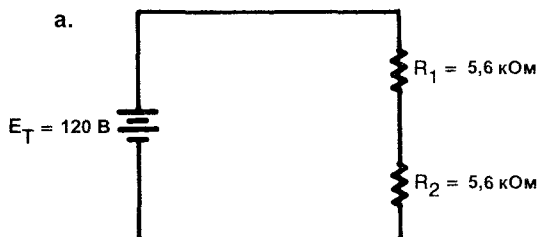
- Общая мощность, потребляемая последовательной или параллельной цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными компонентами:

$$P_T = P_1 + P_2 + P_3 + \dots + P_n.$$

Глава 7. САМОПРОВЕРКА

Найдите неизвестные величины в следующих примерах:

- $P = ?$ $E = 30 \text{ В}$ $I = 40 \text{ мА}$;
- $P = 1 \text{ Вт}$ $E = ?$ $I = 10 \text{ мА}$;
- $P = 12,3 \text{ Вт}$ $E = 30 \text{ В}$ $I = ?$
- Чему равна полная потребляемая мощность в следующих цепях?



Глава 8. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Вычислить все неизвестные величины (силу тока, напряжение, сопротивление и мощность) в последовательной, параллельной и последовательно-параллельной цепи.

При изучении электроники некоторые цепи встречаются неоднократно. Наиболее широко используемыми цепями являются: последовательная, параллельная и последовательно-параллельная.

В этой главе информация из нескольких предыдущих глав применяется для вычисления любых неизвестных величин в упомянутых трех типах цепей.

8-1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

Последовательная цепь (рис. 8-1) обеспечивает только один путь для протекания тока. Факторы, определяющие свойства последовательной цепи, таковы:

1. Одинаковый ток течет через каждый элемент последовательной цепи.

$$(I_T = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_3} = \dots = I_{R_n}).$$

2. Полное сопротивление последовательной цепи равно сумме отдельных сопротивлений.

$$(R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n).$$

3. Полное напряжение на последовательной цепи равно сумме отдельных падений напряжений.

$$(E_T = E_{R_1} + E_{R_2} + E_{R_3} + \dots + E_{R_n}).$$

1. Падение напряжения на резисторе в последовательной цепи пропорционально сопротивлению резистора.

$$(I = E/R).$$

5. Полная мощность, выделяемая в последовательной цепи, равна сумме мощностей, выделяемых на отдельных резисторах.

$$(P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \dots + P_{R_n}).$$

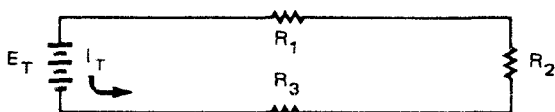


Рис. 8-1. Последовательная цепь.

ПРИМЕР: Три резистора, 47 ом, 100 ом и 150 ом, соединены последовательно с батареей 12 вольт. Вычислите все параметры цепи.

В качестве первого шага нарисуем схему цепи и перечислим все известные и неизвестные величины. См. рис. 8-2.

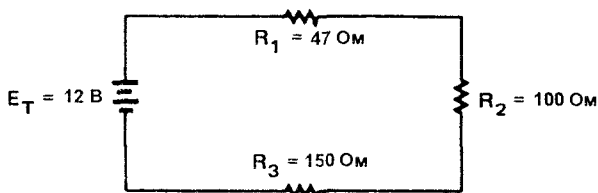


Рис. 8-2.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R_T = ?$$

$$P_T = ?$$

$$R_1 = 47 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 150 \text{ Ом.}$$

$$E_{R_1} = ?$$

$$E_{R_2} = ?$$

$$E_{R_3} = ?$$

$$P_{R_1} = ?$$

$$P_{R_2} = ?$$

$$P_{R_3} = ?$$

При вычислении всех неизвестных значений сначала надо найти полное сопротивление. После этого можно определить текущий по цепи ток. Когда известен ток, можно определить падения напряжений и выделяемую мощность.

Дано:

$R_1 = ?$

$R_1 = 47 \text{ Ом}$

$R_2 = 100 \text{ Ом}$

$R_3 = 150 \text{ Ом.}$

Решение:

$R_i = R_1 + R_2 + R_3$

$R_i = 47 + 100 + 150$

$R_i = 297 \text{ Ом.}$

С помощью закона Ома вычислим ток:

Дано:

$I_T = ?$

$E_T = 12 \text{ В}$

$R_T = 297 \text{ Ом.}$

Решение:

$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{297}$

$I_T = 0,040 \text{ А.}$

Так как $I_T = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_3}$, падение напряжения (E_{R_1}) на резисторе R_1 можно вычислить следующим образом:

Дано:

$I_{R_1} = 0,040 \text{ А}$

$E_{R_1} = ?$

$R_1 = 47 \text{ Ом.}$

Решение:

$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$

$0,040 = \frac{E_{R_1}}{47}$

$E_{R_1} = 1,88 \text{ В.}$

Падение напряжения (E_{R_2}) на резисторе R_2 равно:*Дано:*

$I_{R_1} = 0,040 \text{ А}$

$E_{R_2} = ?$

$R_2 = 100 \text{ Ом.}$

Решение:

$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$

$0,040 = \frac{E_{R_2}}{100}$

$E_{R_2} = 4 \text{ В.}$

Падение напряжения (E_{R_3}) на резисторе R_3 равно:*Дано:*

$I_{R_3} = 0,040 \text{ А}$

$E_{R_3} = ?$

$R_3 = 150 \text{ Ом.}$

Решение:

$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3}$

$0,040 = \frac{E_{R_3}}{150}$

$E_{R_3} = 6 \text{ В.}$



Убедимся в том, что сумма отдельных падений напряжения равна полному напряжению.

Дано:

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$E_{R_1} = 1,88 \text{ В}$$

$$E_{R_2} = 4 \text{ В}$$

$$E_{R_3} = 6 \text{ В.}$$

Решение:

$$E_T = E_{R_1} + E_{R_2} + E_{R_3}$$

$$E_T = 1,88 + 4 + 6$$

$$E_T = 11,88 \text{ В.}$$

Мы видим, что есть небольшое различие между вычисленным и заданным напряжением, которое возникло вследствие округления полного тока до трех десятичных знаков.

Мощность, выделяемая на резисторе R_1 равна:

Дано:

$$P_{R_1} = ?$$

$$I_{R_1} = 0,040 \text{ А}$$

$$E_{R_1} = 1,88 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$P_{R_1} = (0,040)(1,88)$$

$$P_{R_1} = 0,075 \text{ Вт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_2 , равна:

Дано:

$$P_{R_2} = ?$$

$$I_{R_2} = 0,040 \text{ А}$$

$$E_{R_2} = 4 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_2} = (0,040)(4)$$

$$P_{R_2} = 0,16 \text{ Вт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_3 , равна:

Дано:

$$P_{R_3} = ?$$

$$I_{R_3} = 0,040 \text{ А}$$

$$E_{R_3} = 6 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_3} = I_{R_3} E_{R_3}$$

$$P_{R_3} = (0,040)(6)$$

$$P_{R_3} = 0,24 \text{ Вт.}$$

Полная выделяемая в цепи мощность равна:

Дано:

$$P_T = ?$$

$$P_{R_1} = 0,075 \text{ Вт}$$

$$P_{R_2} = 0,16 \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = 0,24 \text{ Вт.}$$

Решение:

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$$

$$P_T = 0,075 + 0,16 + 0,24$$

$$P_T = 0,475 \text{ Вт или } 475 \text{ мВт.}$$

8-1. Вопросы

1. Четыре резистора — 270 ом, 560 ом, 1200 ом и 1500 ом — соединены последовательно с батареей 28 вольт. Вычислите все неизвестные параметры цепи.



8-2. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

Параллельная цепь (рис. 8-3) — это такая цепь, которая содержит более чем один путь для тока. Свойства параллельной цепи определяются тем, что:

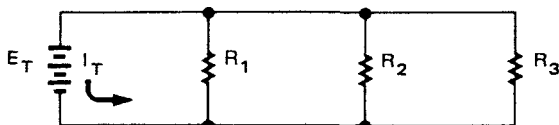


Рис. 8-3. Параллельная цепь.

1. Ко всем ветвям параллельной цепи приложено одинаковое напряжение, равное напряжению источника тока.

$$(E_T = E_{R_1} = E_{R_2} = E_{R_3} = \dots = E_{R_n}).$$

2. Ток через каждую ветвь параллельной цепи обратно пропорционален сопротивлению этой ветви.

$$(I = E/R).$$

3. Общий ток в параллельной цепи равен сумме токов в отдельных ветвях.

$$(I_T = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} + \dots + I_{R_n}).$$

4. Обратная величина полного сопротивления параллельной цепи равна сумме обратных величин сопротивлений отдельных ветвей.

$$\left(\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \right).$$

5. Общая мощность, потребляемая параллельной цепью, равна сумме мощностей, потребляемых отдельными резисторами.

$$(P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \dots + P_{R_n}).$$

ПРИМЕР: Три резистора — 100 ом, 220 ом и 470 ом — соединены параллельно с батареей 48 вольт. Вычислите все неизвестные величины в цепи.

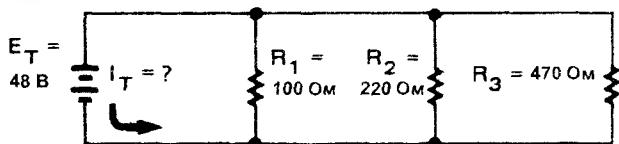


Рис. 8-4.

Сначала нарисуем схему цепи и перепишем все известные величины (рис. 8-4).

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 48 \text{ В}$$

$$R_T = ?$$

$$P_T = ?$$

$$R_1 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 220 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 470 \text{ Ом}$$

$$I_{R_1} = ?$$

$$I_{R_2} = ?$$

$$I_{R_3} = ?$$

$$P_{R_1} = ?$$

$$P_{R_2} = ?$$

$$P_{R_3} = ?$$

В процессе вычисления всех неизвестных величин в цепи сначала надо найти полное сопротивление цепи. После этого можно найти токи, текущие в отдельных ветвях цепи. Зная токи, можно вычислить мощности, выделяемые на каждом резисторе.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 100 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 220 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 470 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

(Общий знаменатель будет слишком большим. Перейдем к десятичным дробям.)

$$\frac{1}{R_T} = 0,01 + 0,005 + 0,002$$

$$\frac{1}{R_T} = 0,017$$

$$R_T = 58,82 \text{ Ом.}$$

Ток (I_{R_1}) через резистор R_1 равен:

Дано:

$$I_{R_1} = ?$$

Решение:

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1} = \frac{48}{100}$$



$$E_{R_1} = 48 \text{ В}$$

$$I_{R_1} = 0,48 \text{ А.}$$

$$R_1 = 100 \text{ Ом.}$$

Ток (I_{R_2}) через резистор R_2 равен:

Дано:

Решение:

$$I_{R_2} = ?$$

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2} = \frac{48}{220}$$

$$E_{R_2} = 48 \text{ В}$$

$$R_2 = 220 \text{ Ом.}$$

$$I_{R_2} = 0,218 \text{ А.}$$

Ток (I_{R_3}) через резистор R_3 равен:

Дано:

Решение:

$$I_{R_3} = ?$$

$$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3} = \frac{48}{470}$$

$$E_{R_3} = 48 \text{ В}$$

$$R_3 = 470 \text{ Ом.}$$

$$I_{R_3} = 0,102 \text{ А.}$$

Общий ток равен:

Дано:

Решение:

$$I_T = ?$$

$$I_T = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3}$$

$$I_{R_1} = 0,48 \text{ А}$$

$$I_T = 0,48 + 0,218 + 0,102$$

$$I_{R_2} = 0,218 \text{ А}$$

$$I_T = 0,800 \text{ А.}$$

$$I_{R_3} = 0,102 \text{ А.}$$

Общий ток может быть также найден с помощью закона Ома:

Дано:

Решение:

$$I_T = ?$$

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{48}{58,82}$$

$$E_T = 48 \text{ В}$$

$$R_T = 58,82 \text{ Ом.}$$

$$I_T = 0,82 \text{ А.}$$

Мы опять имеем некоторое расхождение, обусловленное округлением.

Мощность, выделяемая на резисторе R_1 , равна:

Дано:

Решение:

$$P_{R_1} = ?$$

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$



$$I_{R_1} = 0,48 \text{ A}$$

$$E_{R_1} = 48 \text{ В.}$$

$$P_{R_1} = (0,48)(48)$$

$$P_{R_1} = 23,04 \text{ Вт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_2 , равна:

Дано:

$$P_{R_2} = ?$$

$$I_{R_2} = 0,218 \text{ A}$$

$$E_{R_2} = 48 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_2} = (0,218)(48)$$

$$P_{R_2} = 10,46 \text{ Вт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_3 , равна:

Дано:

$$P_{R_3} = ?$$

$$I_{R_3} = 0,102 \text{ A}$$

$$E_{R_3} = 48 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_3} = I_{R_3} E_{R_3}$$

$$P_{R_3} = (0,102)(48)$$

$$P_{R_3} = 4,90 \text{ Вт.}$$

Полная выделяемая в цепи мощность равна:

Дано:

$$P_T = ?$$

$$P_{R_1} = 23,04 \text{ Вт}$$

$$P_{R_2} = 10,46 \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = 4,90 \text{ Вт.}$$

Решение:

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3}$$

$$P_T = 23,04 + 10,46 + 4,90$$

$$P_T = 38,40 \text{ Вт.}$$

Общую мощность можно также определить с помощью закона Ома:

Дано:

$$P_T = ?$$

$$I_T = 0,80 \text{ A}$$

$$E_T = 48 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,80)(48)$$

$$P_T = 38,4 \text{ Вт.}$$

8-2. Вопросы

1. Четыре резистора — 2200 ом, 2700 ом, 3300 ом и 5600 ом — соединены параллельно с батареей напряжением 9 вольт. Вычислить все неизвестные величины в цепи.

8-3. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО-ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ

Большинство цепей содержит как последовательные, так и параллельные участки. Цепи этого типа называются *последовательно-параллельными* (рис. 8-5). Расчеты большинства последовательно-параллельных цепей — это

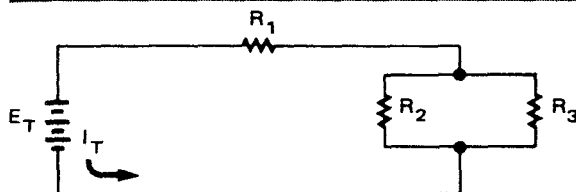


Рис. 8-5. Последовательно-параллельная цепь.

просто применение законов и правил, обсуждавшихся ранее. Формулы для последовательных цепей применяются к последовательным участкам цепи, а формулы для параллельных цепей — к параллельным участкам цепи.

ПРИМЕР: Вычислите все неизвестные величины для цепи на рис. 8-6.

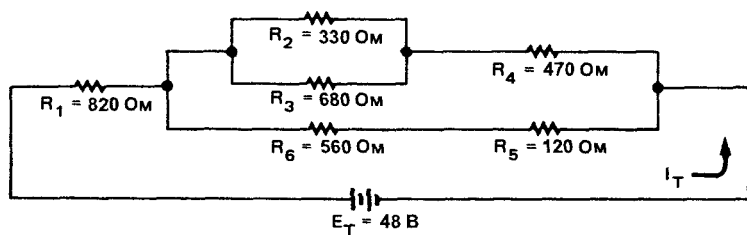


Рис. 8-6.

Дано:

$$I_T = ?, E_T = 48 \text{ Вольт}, R_T = ?, P_T = ?$$

$$R_1 = 820 \text{ Ом} \quad I_{R_1} = ? \quad E_{R_1} = ? \quad P_{R_1} = ?$$

$$R_2 = 330 \text{ Ом} \quad I_{R_2} = ? \quad E_{R_2} = ? \quad P_{R_2} = ?$$

$$R_3 = 680 \text{ Ом} \quad I_{R_3} = ? \quad E_{R_3} = ? \quad P_{R_3} = ?$$

$$R_4 = 470 \text{ Ом} \quad I_{R_4} = ? \quad E_{R_4} = ? \quad P_{R_4} = ?$$

$$R_5 = 120 \text{ Ом} \quad I_{R_5} = ? \quad E_{R_5} = ? \quad P_{R_5} = ?$$

$$R_6 = 560 \text{ Ом} \quad I_{R_6} = ? \quad E_{R_6} = ? \quad P_{R_6} = ?$$

Для того чтобы вычислить полное сопротивление (R_T), сначала найдем эквивалентное сопротивление (R_A) параллельно соединенных резисторов R_2 и R_3 . Затем вычислим



эквивалентное сопротивление резисторов R_A и R_4 (обозначенное как R_{S1}) и R_5 и R_6 (обозначенное как R_{S2}). После этого можно определить эквивалентное сопротивление R_B для R_{S1} и R_{S2} . И, наконец, найдем общее сопротивление последовательно соединенных R_1 и R_B .

Дано:

$$R_A = ?$$

$$R_2 = 330 \text{ Ом}$$

$$R_3 = 680 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{330} + \frac{1}{680}$$

(Общий знаменатель будет слишком большим. Перейдем к десятичным дробям.)

$$\frac{1}{R_A} = 0,00303 + 0,00147$$

$$\frac{1}{R_A} = 0,0045$$

$$R_A = 222,22 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь, заменяя резисторы R_2 и R_3 резистором R_A . См. рис. 8-7.

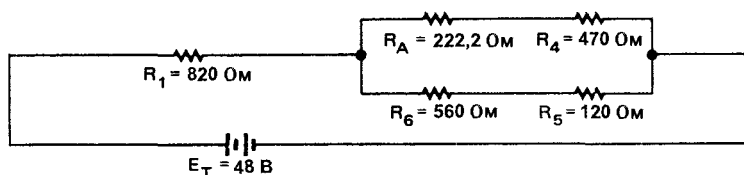


Рис. 8-7.

Теперь определим сопротивление R_{S1} последовательно соединенных резисторов R_A и R_4 .

Дано:

$$R_{S1} = ?$$

$$R_A = 222,22 \text{ Ом}$$

$$R_4 = 470 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_{S1} = R_A + R_4$$

$$R_{S1} = 222,22 + 470$$

$$R_{S1} = 692,22 \text{ Ом.}$$

Определим сопротивление R_{S2} последовательно соединенных резисторов R_5 и R_6 .



Дано:

$$R_{S2} = ?$$

$$R_5 = 120 \text{ Ом}$$

$$R_6 = 560 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_{S2} = R_5 + R_6$$

$$R_{S2} = 120 + 560$$

$$R_{S2} = 680 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь с резисторами R_{S1} и R_{S2} . См. рис. 8-8.

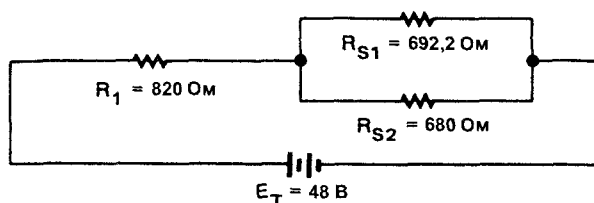


Рис. 8-8.

Теперь определим сопротивление (R_B) параллельно соединенных резисторов R_{S1} и R_{S2} .

Дано:

$$R_B = ?$$

$$R_{S1} = 692,22 \text{ Ом}$$

$$R_{S2} = 680 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{R_{S1}} + \frac{1}{R_{S2}}$$

$$\frac{1}{R_B} = \frac{1}{692,22} + \frac{1}{680}$$

$$\frac{1}{R_B} = 0,00144 + 0,00147$$

$$\frac{1}{R_B} = 0,00291$$

$$R_B = 343,64 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь, используя резистор R_B . См. рис. 8-9.

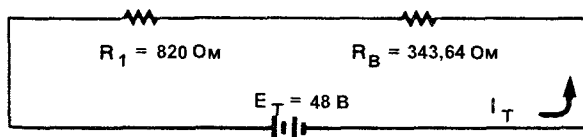


Рис. 8-9.

Теперь определим полное сопротивление цепи.

Дано:

$$R_T = ?$$

$$R_1 = 820 \text{ Ом}$$

$$R_B = 343,64 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_B$$

$$R_T = 820 + 343,64$$

$$R_T = 1163,64 \text{ Ом.}$$



Теперь с помощью закона Ома можно определить полный ток в цепи.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 48 \text{ В}$$

$$R_T = 1163,64 \text{ Ом. } I_T = 0,0412 \text{ А или } 41,2 \text{ мА.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{48}{1163,64}$$

Теперь можно определить падение напряжения на сопротивлении R_1 .

Дано:

$$I_{R_1} = 0,0412 \text{ А}$$

$$E_{R_1} = ?$$

$$R_1 = 820 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$

$$0,0412 = \frac{E_{R_1}}{820}$$

$$E_{R_1} = (0,0412)(820)$$

$$E_{R_1} = 33,78 \text{ В.}$$

Падение напряжения на эквивалентном сопротивлении R_B равно:

Дано:

$$I_{R_B} = 0,0412 \text{ А}$$

$$E_{R_B} = ?$$

$$R_B = 343,64 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_B} = \frac{E_{R_B}}{R_B}$$

$$0,0412 = \frac{E_{R_B}}{343,64}$$

$$E_{R_B} = (343,64)(0,0412)$$

$$E_{R_B} = 14,157 \text{ В.}$$

Ток в каждой ветви параллельной цепи надо вычислить отдельно, учитывая что $E_{R_B} = E_{R_{S1}} = E_{R_{S2}}$.

Ток в ветви с сопротивлением R_{S1} равен:

Дано:

$$I_{R_{S1}} = ?$$

$$E_{R_{S1}} = 14,157 \text{ В}$$

$$R_{S1} = 692,22 \text{ Ом. } I_{R_{S1}} = 0,0205 \text{ А.}$$

Решение:

$$I_{R_{S1}} = \frac{E_{R_{S1}}}{R_{S1}} = \frac{14,157}{692,22}$$



Ток в ветви с сопротивлением R_{S2} равен:

Дано:

Решение:

$$I_{R_{S2}} = ?$$

$$I_{R_{S2}} = \frac{E_{R_{S2}}}{R_{S2}} = \frac{14,157}{680}$$

$$E_{R_{S2}} = 14,157 \text{ В}$$

$$R_{S2} = 680 \text{ Ом.}$$

$$I_{R_{S2}} = 0,0208 \text{ А.}$$

Теперь можно определить падение напряжения на резисторах R_A и R_4 .

Дано:

Решение:

$$I_{R_A} = 0,0205 \text{ А}$$

$$I_{R_A} = \frac{E_{R_A}}{R_A}$$

$$E_{R_A} = ?$$

$$R_A = 222,22 \text{ Ом.} \quad 0,0205 = \frac{E_{R_A}}{222,22}$$

$$E_{R_A} = (0,0205)(222,22)$$

$$E_{R_A} = 4,56 \text{ В.}$$

Дано:

Решение:

$$I_{R_4} = 0,0205 \text{ А}$$

$$I_{R_4} = \frac{E_{R_4}}{R_4}$$

$$E_{R_4} = ?$$

$$R_4 = 470 \text{ Ом.} \quad 0,0205 = \frac{E_{R_4}}{470}$$

$$E_{R_4} = (0,0205)(470)$$

$$E_{R_4} = 9,64 \text{ В.}$$

Падение напряжения на резисторах R_5 и R_6 равно:

Дано:

Решение:

$$I_{R_5} = 0,0208 \text{ А}$$

$$I_{R_5} = \frac{E_{R_5}}{R_5}$$

$$E_{R_5} = ?$$

$$R_5 = 120 \text{ Ом.} \quad 0,0208 = \frac{E_{R_5}}{120}$$

$$E_{R_5} = (0,0208)(120)$$

$$E_{R_5} = 2,50 \text{ В.}$$



Дано:

$$I_{R_6} = 0,0208 \text{ A}$$

$$E_{R_6} = ?$$

$$R_6 = 560 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_6} = \frac{E_{R_6}}{R_6}$$

$$0,0208 = \frac{E_{R_6}}{560}$$

$$E_{R_6} = (0,0208)(560)$$

$$E_{R_6} = 11,65 \text{ В.}$$

Ток через эквивалентное сопротивление R_A расщепляется на два параллельных тока через резисторы R_2 и R_3 . Ток через каждый из этих резисторов надо вычислять отдельно, при этом $E_{R_A} = E_{R_2} = E_{R_3}$.

Ток через резистор R_2 равен:

Дано:

$$I_{R_2} = ?$$

$$E_{R_2} = 4,56 \text{ В}$$

$$R_2 = 330 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2} = \frac{4,56}{330}$$

$$I_{R_2} = 0,0138 \text{ A.}$$

Дано:

$$I_{R_3} = ?$$

$$E_{R_3} = 4,56 \text{ В}$$

$$R_3 = 680 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3} = \frac{4,56}{680}$$

$$I_{R_3} = 0,00671 \text{ A.}$$

Теперь можно определить мощность, выделяющуюся на каждом резисторе. Мощность, потребляемая резистором R_1 , равна:

Дано:

$$P_{R_1} = ?$$

$$I_{R_1} = 0,0412 \text{ A}$$

$$E_{R_1} = 33,78 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$P_{R_1} = (0,0412)(33,78)$$

$$P_{R_1} = 1,39 \text{ Вт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_2 , равна:

Дано:

$$P_{R_2} = ?$$

$$I_{R_2} = 0,0138 \text{ A}$$

$$E_{R_2} = 4,56 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_2} = (0,0138)(4,56)$$

$$P_{R_2} = 0,063 \text{ Вт или } 63 \text{ мВт.}$$



Мощность, выделяемая на резисторе R_3 , равна:

Дано:

Решение:

$$P_{R_3} = ?$$

$$P_{R_3} = I_{R_3} E_{R_3}$$

$$I_{R_3} = 0,00671 \text{ A}$$

$$P_{R_3} = (0,00671)(4,56)$$

$$E_{R_3} = 4,56 \text{ В.}$$

$$P_{R_3} = 0,031 \text{ Вт или } 31 \text{ мВт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_4 , равна:

Дано:

Решение:

$$P_{R_4} = ?$$

$$P_{R_4} = I_{R_4} E_{R_4}$$

$$I_{R_4} = 0,0205 \text{ A}$$

$$P_{R_4} = (0,0205)(9,64)$$

$$E_{R_4} = 9,64 \text{ В.}$$

$$P_{R_4} = 0,20 \text{ Вт или } 200 \text{ мВт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_5 , равна:

Дано:

Решение:

$$P_{R_5} = ?$$

$$P_{R_5} = I_{R_5} E_{R_5}$$

$$I_{R_5} = 0,0208 \text{ A}$$

$$P_{R_5} = (0,0208)(2,50)$$

$$E_{R_5} = 2,50 \text{ В.}$$

$$P_{R_5} = 0,052 \text{ Вт или } 52 \text{ мВт.}$$

Мощность, выделяемая на резисторе R_6 , равна:

Дано:

Решение:

$$P_{R_6} = ?$$

$$P_{R_6} = I_{R_6} E_{R_6}$$

$$I_{R_6} = 0,0208 \text{ A}$$

$$P_{R_6} = (0,0208)(11,65)$$

$$E_{R_6} = 11,65 \text{ В.}$$

$$P_{R_6} = 0,24 \text{ Вт или } 240 \text{ мВт.}$$

Общая мощность, потребляемая в цепи, равна:

Дано:

$$P_T = ?$$

$$P_{R_1} = 1,39 \text{ Вт}$$

$$P_{R_2} = 0,063 \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = 0,031 \text{ Вт}$$

$$P_{R_4} = 0,20 \text{ Вт}$$

$$P_{R_5} = 0,052 \text{ Вт}$$

$$P_{R_6} = 0,24 \text{ Вт.}$$

Решение:

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + P_{R_4} + P_{R_5} + P_{R_6}$$

$$P_T = 1,39 + 0,063 + 0,031 + 0,20 + 0,052 + 0,24$$

$$P_T = 1,98 \text{ Вт.}$$

Общую потребляемую мощность можно также рассчитать с помощью формулы для мощности.



Дано:

$$P_T = ?$$

$$I_T = 0,0413 \text{ A}$$

$$E_T = 48 \text{ В.}$$

Решение:

$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,0413)(48)$$

$$P_T = 1,98 \text{ Вт.}$$

8-3. Вопрос

1. Вычислите все неизвестные величины на схеме, изображенной на рис. 8-10.

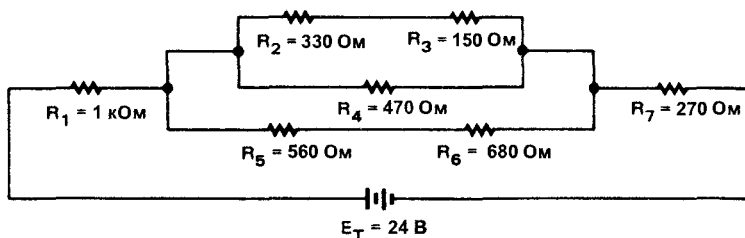


Рис. 8-10.

РЕЗЮМЕ

- Последовательная цепь обеспечивает только один путь для протекания тока.
- Следующие формулы описывают параметры последовательной цепи:

$$I_T = I_{R_1} = I_{R_2} = I_{R_3} = \dots = I_{R_n};$$

$$R_T = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n;$$

$$E_T = E_{R_1} + E_{R_2} + E_{R_3} + \dots + E_{R_n};$$

$$I = E/R;$$

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \dots + P_{R_n}.$$

- Параллельная цепь обеспечивает более чем один путь для протекания тока.
- Следующие формулы описывают параметры параллельной цепи:

$$I_T = I_{R_1} + I_{R_2} + I_{R_3} + \dots + I_{R_n};$$



$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n};$$

$$E_T = E_{R_1} = E_{R_2} = E_{R_3} = \dots = E_{R_n};$$

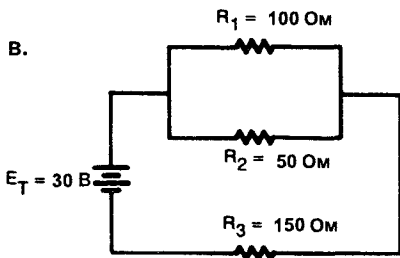
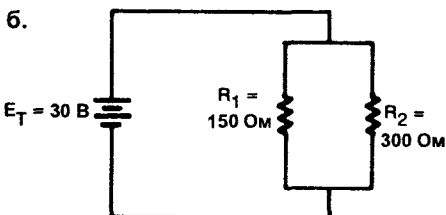
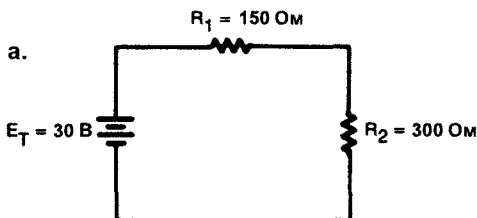
$$I = E/R;$$

$$P_T = P_{R_1} + P_{R_2} + P_{R_3} + \dots + P_{R_n}.$$

- Вычисления для последовательно-параллельных цепей проводятся следующим образом: формулы для последовательных цепей применяются к последовательным участкам цепи, а формулы для параллельных цепей — к параллельным участкам цепи.

Глава 8. САМОПРОВЕРКА

1. Вычислите все неизвестные величины в изображенных цепях.



Глава 9. МАГНЕТИЗМ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Различать три типа магнитов.
- Описать основные формы магнитов.
- Описать различия между постоянными и переменными магнитами.
- Описать магнитные свойства Земли.
- Сформулировать законы магнетизма.
- Объяснить явления магнетизма на основе атомной теории и наличия у электронов спина.
- Объяснить магнетизм на основе теории доменов.
- Описать силовые линии и их значение.
- Дать определение *проницаемости*.
- Описать магнитное действие тока, текущего через проводник.
- Описать принцип работы электромагнита.
- Объяснить, как определить полярность электромагнита с помощью правила левой руки.
- Дать определение *магнитной индукции*.
- Дать определение *остаточной намагниченности* и *остаточного магнетизма*.
- Дать определение *магнитного экрана*.
- Описать, как используется магнетизм для получения электричества.
- Сформулировать основной закон электромагнетизма.
- Описать, как правило левой руки для генераторов может быть использовано для определения полярности индуцированного напряжения.
- Описать, как генераторы постоянного и переменного тока превращают механическую энергию в электрическую.



- Описать, как работает реле в качестве электромеханического переключателя.
- Обсудить сходство дверного звонка и реле.
- Обсудить сходство соленоида и реле.
- Объяснить, как работает магнитная лента в магнитофоне.
- Описать, как работает громкоговоритель.
- Объяснить, как запоминается и считывается информация при магнитной записи.
- Описать, как работает двигатель постоянного тока.

Электричество и магнетизм неразделимы. Понимать суть электричества означает понимать связь, которая существует между магнетизмом и электричеством.

Электрический ток всегда создает магнитное поле, а магнитное поле является главным способом получения электричества. Кроме того, электричество проявляет специфические свойства под влиянием магнетизма.

В этой главе рассмотрен магнетизм, электромагнетизм и связь между магнетизмом и электричеством.

9-1. МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Слово **магнит** происходит от слова магнетит, названия минерала, обнаруженного в Магнезии в Малой Азии. Этот минерал — природный магнит. Другим типом магнитов являются **искусственные магниты**. Они изготовлены из смеси мягкого железа и магнетита. Третьим типом магнитов являются **электромагниты**. В них магнитное поле создается током, текущим по катушке с проводом.

Магниты имеют различные формы (рис. 9-1). Наиболее часто встречаются подковообразные, а также в виде бруска или кольца.

Магниты, сохраняющие свои свойства, называются **постоянными магнитами**. Магниты, сохраняющие только малую часть своих свойств, называются **временными магнитами**.

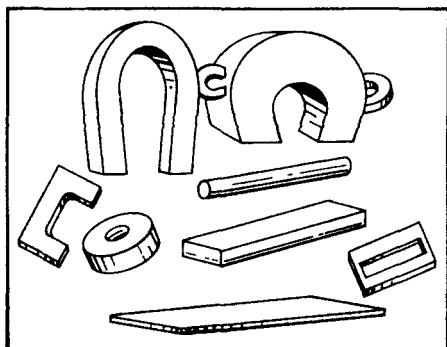


Рис. 9-1. Магниты имеют различные формы и размеры.

Магниты изготовляют из металлических или керамических материалов. Алнико (*алюминий* (Al), *никель* (Ni) и *кобальт* (Co)) и Кунифе (*медь* (Cu), *никель* и *железо* (Fe)) — это два магнитных сплава, используемых для изготовления магнитов.

Сама Земля является громадным магнитом (рис. 9-2). Северный и Южный магнитные полюсы Земли расположены близко к географическим Северному и Южному полюсам, однако не совпадают с ними. Если подвесить прямоугольный магнит, то он расположится вдоль направления север-юг, одним концом указывая на Северный полюс Земли, а другим на Южный. Принцип этот лежит в основе устройства компаса, поэтому два конца магнита называются Северным и Южным полюсами.

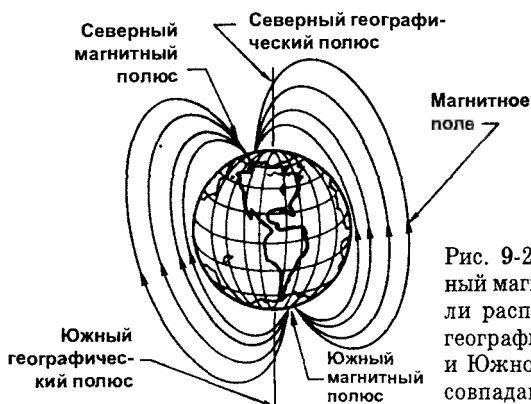


Рис. 9-2. Северный и Южный магнитные полюсы Земли расположены близко к географическим Северному и Южному полюсам, но не совпадают с ними.



Магнит поворачивается в направлении север-юг благодаря закону, аналогичному для положительных и отрицательных зарядов: одноименные магнитные полюса отталкиваются, а разноименные — притягиваются. Магнитные полюса обозначаются цветом: Северный полюс — красным, а Южный полюс — синим.

Природа магнетизма — свойств магнита — имеет в своей основе свойства атома. Электроны, двигаясь по орбитам вокруг ядра атома, вращаются также вокруг своей оси, подобно Земле,двигающейся по орбите вокруг Солнца. Это движение электростатических зарядов создает магнитное поле. Направление магнитного поля зависит от направления вращения электронов. Только железо, никель и кобальт являются природными магнитными элементами. Каждый из этих материалов имеет по два валентных электрона, которые вращаются в одном и том же направлении. Электроны в других материалах имеют тенденцию вращаться в противоположных направлениях, что лишает их магнитных свойств.

Ферромагнитными материалами называются материалы, реагирующие на действие магнитных полей. В ферромагнитных материалах атомы объединяются в *домены* — группы атомов с упорядоченными магнитными полями, вроде микромагнитов. В немагнитном материале магнитные домены расположены хаотично, и суммарный магнитный эффект равен нулю (образец не является магнитом) (рис. 9-3). Если материал намагнитить, то домены выстраиваются в одном направлении, и материал становится магнитом (рис. 9-4). Если намагнитенный образец разделить на маленькие кусочки, каждый кусочек станет магнитом со своими собственными полюсами.

Доказательством «доменной теории» является то, что магнит при нагревании или механическом сотрясении теряет свой магнетизм (домены возвращаются в неупорядоченное состояние). Искусственный магнит, оставленный в покое, постепенно теряет свой магнетизм. Для предотвращения этого прямоугольные магниты должны укладываться

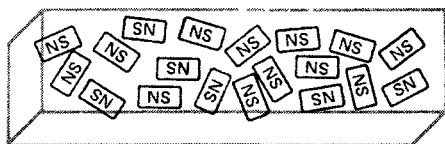
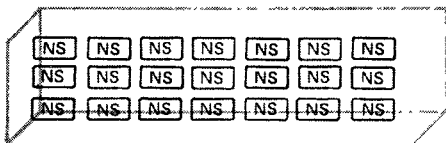


Рис. 9-3. Домены в немагнитном материале ориентированы хаотично и образец не создает магнитного поля.

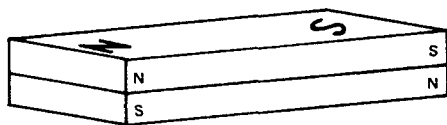
Рис. 9-4. Когда материал намагничен, все домены ориентируются в одном направлении.



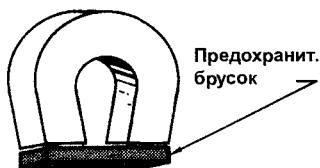
стопкой противоположными полюсами друг к другу; подковообразные магниты должны быть замкнуты предохранительным брусом (рис. 9-5). Оба метода позволяют сохранить магнитное поле.

Магнитное поле состоит из невидимых силовых линий, окружающих магнит. Эти линии можно «увидеть», поместив над магнитом лист бумаги, посыпанный железными опилками. Если бумагу слегка потрясти, то опилки сами упорядочатся в виде определенных линий, отражающих притягивающие их силы (рис. 9-6).

Силовые линии имеют несколько важных особенностей: они направлены от севера к югу и всегда образуют замкнутую кривую; никогда не пересекаются, так как одина-



(А)



(Б)

Рис. 9-5. Для предотвращения потери магнитных свойств плоские магниты укладываются в стопку один на другой (А); между полюсами подковообразного магнита размещается замыкающий брусок (Б).

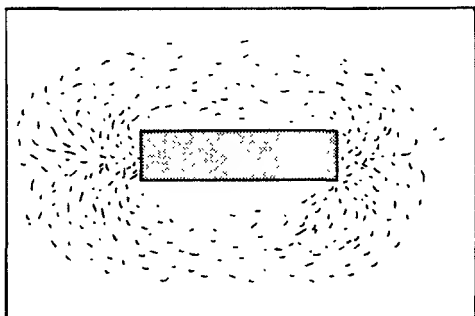


Рис. 9-6. Магнитные силовые линии можно увидеть с помощью железных опилок.

ковые полюсы отталкиваются; стремятся образовать замкнутую линию наименьшего возможного размера, так как противоположные полюсы притягиваются и стремятся к объединению.

Характеристика, определяющая, является вещество ферромагнитным или нет, называется магнитной проницаемостью. *Магнитная проницаемость* — это способность материала воспринимать магнитные силовые линии. Материал с высокой проницаемостью оказывает меньшее сопротивление силовым линиям, чем воздух.

9-1. Вопросы

1. Каковы три типа магнитов?
2. Каковы основные формы магнитов?
3. Как обозначаются концы магнита?
4. Какие две теории магнетизма вы знаете?
5. Что такое силовые линии?

9-2. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И МАГНЕТИЗМ

Когда ток течет по проводу, он создает вокруг провода **магнитное поле** (рис. 9-7). Это можно доказать, размещая компас сначала вблизи провода, по которому ток не течет. Стрелка компаса устанавливается по направлению магнитного поля Земли. Если затем пропускать через проводник электрический ток, стрелка компаса отклоняется и устанавливается вдоль магнитного поля, создаваемого током.

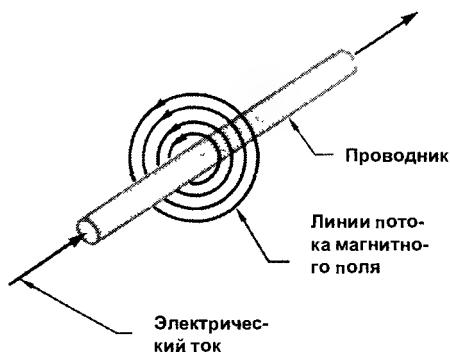


Рис. 9-7. Ток, текущий через проводник, создает магнитное поле вокруг проводника.

Направление силовых линий можно определить по известному направлению тока. Если провод обхватить левой рукой так, чтобы большой палец указывал направление тока, остальные пальцы укажут направление силовых линий (рис. 9-8). Если поменять полярность источника тока, то направление силовых линий также изменится на противоположное.

Если два провода с токами, текущими в противоположных направлениях, разместить рядом друг с другом, они создадут противоположно направленные магнитные поля, которые будут отталкивать друг друга (рис. 9-9). Если по двум рядом расположенным проводам текут токи одинакового направления, то их поля объединяются (рис. 9-10).

Простой отрезок провода, создающий магнитное поле небольшой величины, не имеет практического значения. Если провод свернуть в кольцо, то имеют место три явле-



Рис. 9-8. Определение направления силовых линий вокруг проводника по правилу левой руки при известном направлении тока.

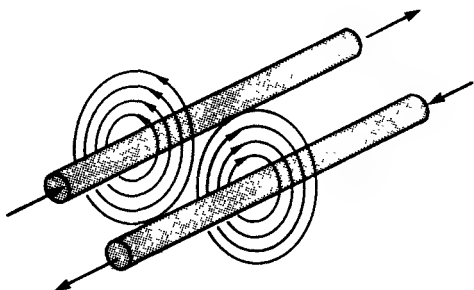
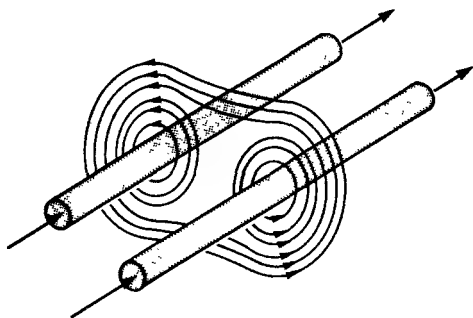


Рис. 9-9. Когда токи текут в противоположных направлениях через два расположенных рядом проводника, создаваемые магнитные поля отталкивают их друг от друга.

Рис. 9-10. Когда токи текут в одном направлении через два расположенных рядом проводника, их магнитные поля складываются, а сами они притягиваются друг к другу.



ния: во-первых, силовые линии собираются вместе, во-вторых, силовые линии концентрируются в центре кольца, в-третьих, появляются Северный и Южный полюсы. В этом состоит принцип работы электромагнита.

Электромагнит состоит из большого количества витков провода, уложенных близко друг к другу. Это позволяет силовым линиям собраться вместе, при протекании тока по проводу. Чем больше витков провода, тем больше силовых линий собирается вместе, и чем больше ток, тем больше создается силовых линий. Следовательно, величина магнитного поля прямо пропорциональна количеству витков в катушке и величине протекающего по ней тока.

Третьим методом увеличения магнитного поля является помещение внутрь катушки ферромагнитного сердечника. Обычно используется железный сердечник, так как он имеет более высокую восприимчивость (может поддерживать больше силовых линий), чем воздух.

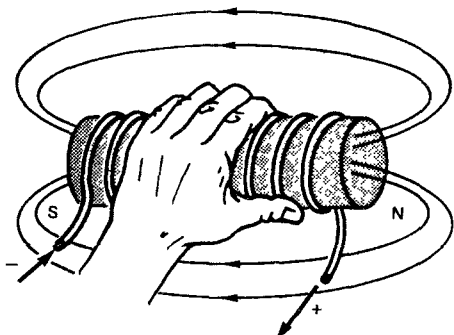


Рис. 9-11. Определение полярности электромагнита по правилу левой руки.

Для определения полярности электромагнита обхватите катушку левой рукой так, чтобы четыре пальца указывали направление тока. Тогда большой палец укажет направление на Северный полюс магнита (рис. 9-11).

9-2. Вопросы

1. Как можно обнаружить наличие магнитного поля при протекании тока через проводник?
2. Как можно определить направление силовых линий вокруг проводника?
3. Что случится, если разместить рядом два проводника с токами, текущими:
 - а. В одном направлении?
 - б. В противоположных направлениях?
4. Каковы три способа увеличения величины электромагнитного поля?
5. Как можно определить полярность электромагнита?

9-3. МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Магнитная индукция — это влияние магнита на объект без механического контакта. Например, магнит может индуцировать магнитное поле в железном бруске (рис. 9-12). Проходя через железный брусок, магнитные силовые линии ориентируют домены железного бруска в одном направлении. Теперь железный брусок является магнитом.

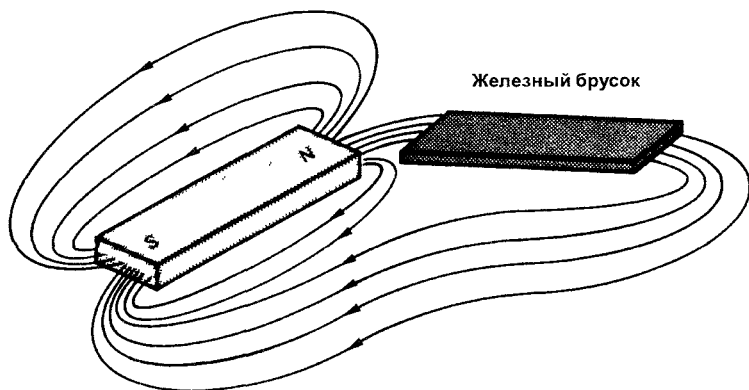


Рис. 9-12. Размещение железного бруска в магнитном поле изменяет конфигурацию магнитных силовых линий и намагничивает железный брусок.

Домены в железном бруске ориентируются своим Южным полюсом по направлению к Северному полюсу магнита, так как противоположные полюсы притягиваются. По той же причине железный брусок подтягивается по направлению к магниту. Теперь из конца бруска выходят силовые линии — железный брусок является продолжением магнита. Этот метод является эффективным способом увеличения длины или изменения формы магнита, не изменяя его физически.

Если магнит и железный брусок удалить друг от друга, домены в железном бруске вернуться к своему хаотичному распределению, хотя некоторые домены останутся в прежнем упорядоченном состоянии, сохраняя у бруска слабое магнитное поле. Это магнитное поле называется *остаточной намагниченностью*. Способность материала сохранять магнитное поле после удаления намагничивающей силы называется способностью сохранять остаточную намагниченность. Мягкое железо имеет низкую способность к остаточной намагниченности. С другой стороны, аллико, сплав из алюминия, никеля и кобальта, имеет высокую способность к остаточной намагниченности.



Силовые линии можно изогнуть, вставив материал с низким магнитным сопротивлением перед источником магнитного поля. Материалы с низким магнитным сопротивлением называются *магнитными экранами*. Примером служит материал, который называется *мю-металл*. Магнитный экран размещается вокруг предмета, который должен быть защищен. Электронное оборудование, особенно осциллографы, требуют экранирования от магнитных силовых линий.

Электромагнитная индукция является эффектом, лежащим в основе производства электричества: если замкнутый проводник перемещается в магнитном поле или находится в изменяющемся магнитном поле, то в нем возникает электрический ток. При перемещении проводника в магнитном поле электроны перемещаются к одному концу проводника, создавая на другом конце проводника дефицит электронов. В результате на концах проводника возникает разность потенциалов. Эта разность потенциалов существует только тогда, когда проводник перемещается относительно магнитного поля. Когда проводник удаляют из магнитного поля, свободные электроны возвращаются к атомам.

Электромагнитная индукция имеет место в двух случаях: когда проводник перемещается относительно магнитного поля, или когда магнитное поле перемещается относительно проводника. Напряжение, возникающее в проводнике, называется *индуцированным напряжением*, или э.д.с. индукции. Величина этой э.д.с. определяется величиной магнитного поля, скоростью, с которой проводник перемещается относительно магнитного поля, углом, под которым находится проводник относительно магнитного поля, и длиной проводника.

Чем сильнее магнитное поле, тем больше величина э.д.с. индукции. Чем быстрее проводник перемещается относительно поля, тем больше э.д.с. индукции. Относительное движение проводника и магнитного поля может возникать вследствие перемещения проводника (но не вдоль самого себя), магнитного поля или и того, и другого. Максималь-



ное напряжение индуцируется, когда проводник перемещается под прямым углом по отношению к силовым линиям магнитного поля. При углах меньших 90 градусов индуцируется меньшее напряжение. Если проводник перемещается параллельно силовым линиям, э.д.с. индукции не возникает. Чем длиннее проводник, тем больше индуцированное напряжение.

Закон Фарадея, основной закон электромагнетизма, формулируется следующим образом: э.д.с. индукции в проводнике прямо пропорциональна скорости, с которой проводник пересекает магнитные силовые линии, т.е. скорости изменения магнитного потока.

Полярность индуцированного напряжения может быть определена с помощью правила левой руки для генераторов: большой палец, указательный и средний пальцы необходимо установить под прямым углом друг к другу (рис. 9-13). Большой палец указывает направление перемещения проводника, указательный — направление силовых линий, а средний палец укажет на отрицательный конец проводника, то есть направление тока.

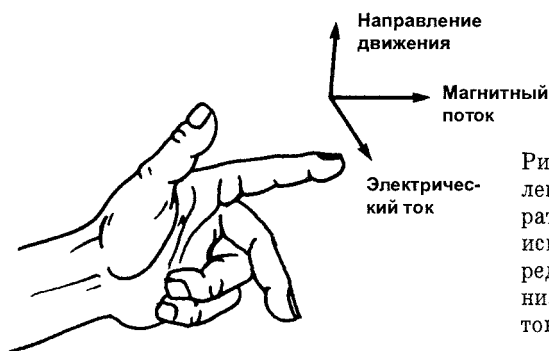


Рис 9-13. Правило левой руки для генераторов может быть использовано для определения направления индуцированного тока в генераторе

9-3. Вопросы

1. Как может быть увеличена длина магнита без физического воздействия на магнит?
2. Что такое остаточный магнетизм?



3. Как работает магнитный экран?
4. Как электромагнитная индукция используется для получения электричества?

9-4. ПРИМЕНЕНИЯ МАГНЕТИЗМА И ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА

Генератор переменного тока преобразует механическую энергию в электрическую, используя принцип электромагнитной индукции. Механическая энергия необходима для осуществления движения проводника относительно магнитного поля.

На рис. 9-14 изображена рамка (проводник), вращающаяся в магнитном поле. Рамка имеет светлую и темную стороны для удобства объяснения. В момент, показанный на (А), темная половина рамки движется параллельно силовым линиям, как и светлая половина. Напряжение не индуцируется. При повороте рамки в положение (Б) она пересекает силовые линии, и напряжение индуцируется. В этом положении индуцированное напряжение максимально, так как плоскость рамки образует прямой угол с магнитным полем. При перемещении рамки в положение В количество пересекаемых силовых линий уменьшается, и индуцированное напряжение убывает от максимального значения до нуля. В этот момент рамка повернулась на 180 градусов или совершила пол-оборота.

Направление тока можно определить, применяя правило левой руки для генераторов. Направление тока в положении Б показано стрелкой. Когда рамка поворачивается в положение Г, направления перемещения меняются. Теперь темная половина рамки движется вверх через магнитные силовые линии, а светлая половина рамки движется вниз. Применение правила левой руки для генераторов показывает, что индуцированное напряжение изменяет полярность. Напряжение достигает максимума в положении Г и уменьшается до нуля, когда рамка возвращается в исходное положение. Индуцированное напряжение завершило один цикл с двумя сменами полярности.

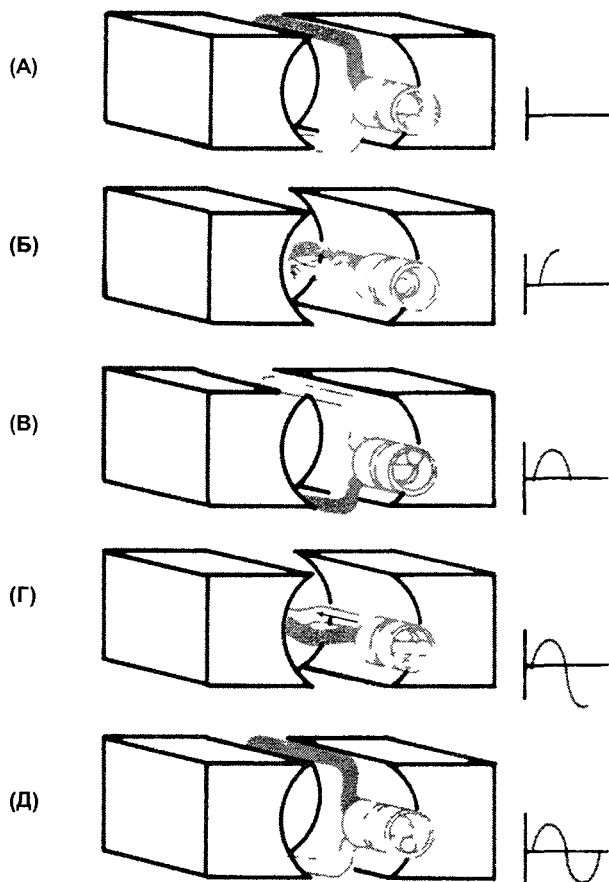


Рис. 9-14. Индуцированное напряжение в генераторе переменного тока

Вращающаяся рамка называется *якорем*, причем якорь может иметь любое количество рамок. Термин «якорь» относится к детали, которая вращается в магнитном поле, независимо от того, из одной или из нескольких рамок она состоит. *Частота* переменного тока или напряжения — это число полных оборотов якоря в секунду, а скорость вращения определяет частоту. Такое устройство называют *генератором переменного тока*.

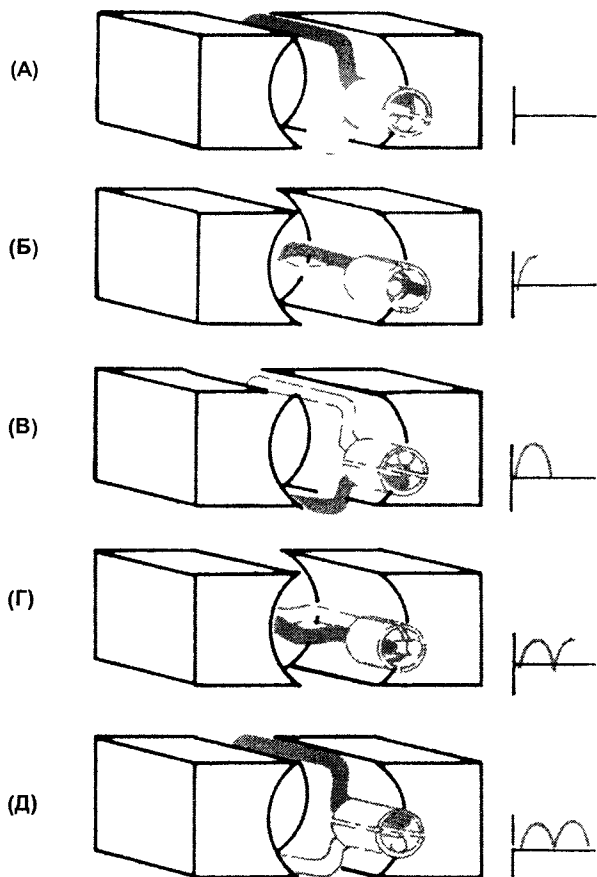


Рис. 9-15 Индуцированное напряжение в генераторе постоянного тока.

Генератор постоянного тока также преобразует механическую энергию в электрическую. Он работает подобно генератору переменного тока, за исключением того, что преобразует переменное напряжение в постоянное, и делает это с помощью устройства, называемого *коллектором*, как показано на рис. 9-15. Выходное напряжение снимается с коллектора — расщепленного кольца. Когда рамка вращается из положения А в положение Б, индуцируется напря-



жение. Индуцированное напряжение максимально, когда направление движения рамки образует прямой угол с магнитным полем. Когда рамка перемещается в положение В, индуцированное напряжение уменьшается от максимального значения до нуля. Когда рамка продолжает перемещаться в положение Г, напряжение также индуцируется, но коллектор меняет его полярность, и оно остается таким же, как раньше. После этого рамка возвращается в исходное положение Д. Напряжение, генерируемое коллектором, является пульсирующим, но оно всегда направлено только в одном направлении, дважды изменяясь от нуля до максимума в течение каждого оборота.

Реле — это электромагнитный переключатель, который включается и выключается с помощью электромагнитной катушки (рис. 9-16). Когда через катушку течет ток, он создает магнитное поле, притягивающее сердечник электромагнита. Когда сердечник притянут, он замыкает переключающие контакты. Когда ток не поступает в катушку, пружина отпускает сердечник, и он размыкает контакты.

Реле используется в тех случаях, когда необходимо с помощью одной цепи управлять другой цепью, причем эти цепи электрически изолированы. При этом малое напряжение или ток может управлять большим напряжением

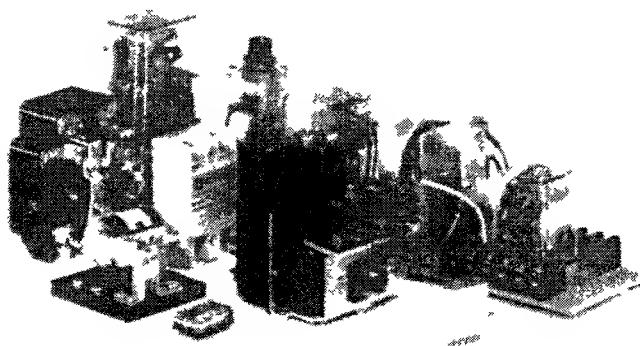


Рис. 9-16 Примеры различных типов реле



или током. Реле также может использоваться для управления несколькими цепями, находящимися на некотором расстоянии.

Дверной звонок является примером использования реле. Молоточек, ударяющий по чашке звонка, прикреплен к сердечнику. Когда нажимается кнопка, ток поступает в катушку, которая притягивает сердечник, и молоточек ударяет по чашке. Когда сердечник притягивается, он разрывает цепь, и ток перестает поступать в катушку. Сердечник возвращается обратно пружиной и замыкает контакты, давая возможность току опять течь через катушку, и это все периодически повторяется пока нажата кнопка.

Соленоид (рис. 9-17) подобен реле. Катушка, когда по ней течет ток, притягивает сердечник, производящий какую-либо механическую работу. Он используется в некоторых дверных звонках (колокольчиках), где сердечник электромагнита притягивает металлическую пластину, а также используется в автомобильных стартерах. Электромагнит притягивает стартерный механизм и приводит в действие маховик, запускающий двигатель.

А. Магнитное поле окружает отдельный проводник, когда по нему течет электрический ток.

Б. Магнитные поля отдельных витков складываются и увеличенное магнитное поле окружает катушку, когда по ней течет электрический ток.

В. Добавление металлического сердечника еще больше увеличивает магнитную силу.

Г. Замыкающий сердечник обеспечивает путь через металл магнитного поля максимальной величины.

Д. Положение нагруженного сердечника перед включением тока. Ток, текущий по катушке, создает магнитное поле, втягивающее сердечник внутрь катушки.

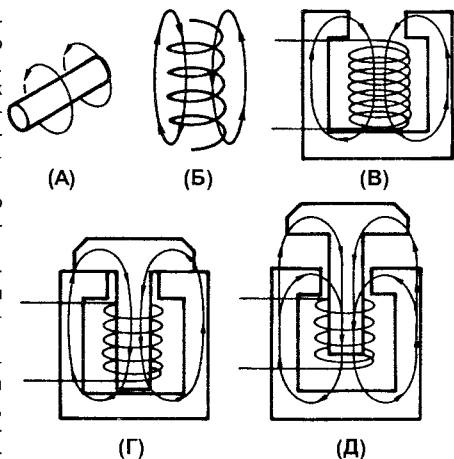


Рис. 9-17. Пример соленоида.



Головки звукозаписывающих устройств также используют электромагнитный принцип. Магнитное поле создается постоянным магнитом, к которому прикреплена игла. Постоянный магнит помещен внутри небольшой катушки. Когда игла перемещается вдоль углублений в грампластинке, она перемещает магнит вверх и вниз и из стороны в сторону, в соответствии с записанным звуковым сигналом. Движение магнита в катушке индуцирует небольшое напряжение, которое изменяется в соответствии со звуковым сигналом. После этого индуцированное напряжение усиливается и подается на громкоговоритель, воспроизводящий звуковой сигнал.

Громкоговорители используются для всех типов усилителей звуковой частоты. Большинство современных громкоговорителей содержат катушку, перемещающуюся около постоянного магнита. Магнит создает постоянное магнитное поле. Когда через катушку проходит ток, он создает магнитное поле, изменяющееся в соответствии со звуковым сигналом. Изменяющееся магнитное поле катушки притягивается и отталкивается магнитным полем постоянного магнита. Катушка прикреплена к конусу, который двигается вперед и назад в соответствии со звуковым сигналом. Конус, двигаясь вперед и назад, перемещает воздух и воспроизводит звуковую волну.

Для магнитной записи используются магнитофоны катушечного типа, кассетные магнитофоны, 8-дорожечные магнитофоны, видеоманитоны, дисководы флоппи-дисков и дисководы жестких дисков. Все эти носители используют один и тот же электромагнитный принцип хранения информации. Сигнал записывается на ленту или диск с помощью записывающей головки и потом считывается с помощью головки воспроизведения. В некоторых изделиях головки записи и воспроизведения объединены в одном корпусе, или могут быть одной и той же головкой. Головка записи или воспроизведения является катушкой с ферромагнитным сердечником. В крошечной щели между концами сердечника сосредоточено магнитное поле. Когда



магнитный носитель, то есть материал, покрытый окисью железа, перемещается мимо записывающей головки, магнитное поле проникает в пленку и намагничивает ее. Информация записывается на ней в виде магнитного узора, соответствующего оригинальной информации. При воспроизведении или чтении информации носитель перемещается мимо щели головки воспроизведения. Изменяющееся магнитное поле индуцирует небольшое напряжение в витках катушки. Сигнал усиливается, и воспроизводится записанная информация.

Работа двигателя постоянного тока основана на принципе, согласно которому на проводник с током, помещенный в магнитное поле под прямым углом к нему, действует сила, стремящаяся переместить его в направлении, перпендикулярном и направлению тока, и направлению поля. Рис. 9-18(А) показывает магнитное поле между Северным и Южным полюсами магнита. Рис. 9-18(Б) показывает магнитное поле, существующее вокруг проводника с током. Знак плюс показывает, что ток течет к нам. Направление силовых линий может быть определено с помощью правила левой руки. Рис. 9-18(В) показывает проводник, помещенный в магнитное поле. Заметим, что оба поля стали искаженными. Выше проводника поле ослабло, и проводник стремится переместиться вверх. Величина силы,двигающей проводник вверх, зависит от величины магнитного поля между полюсами и от величины тока, текущего по проводнику. Если изменить направление тока, текущего через проводник (рис. 9-18(Г)), то и магнитное поле вокруг проводника поменяет направление. Магнитное поле ниже проводника станет слабее, и проводник будет стремиться двигаться вниз.

Метод определения направления движения проводника с током в магнитном поле дает правило правой руки: когда большой палец, указательный и средний пальцы правой руки расположены под прямыми углами друг к другу, причем средний палец указывает направление тока в проводнике, а указательный — направление магнитного поля

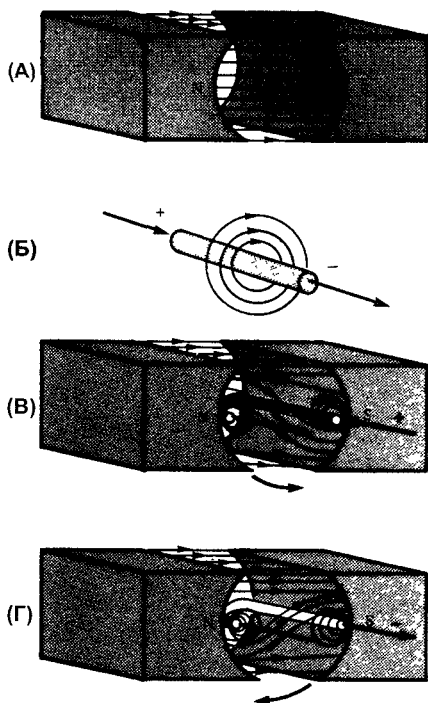


Рис. 9-18. Работа двигателя постоянного тока.

от Северного полюса к Южному, тогда большой палец будет указывать направление перемещения проводника.

Сила, действующая на проводник с током в магнитном поле, зависит от величины магнитного поля, длины проводника и силы тока, текущего по проводнику.

Если рамку с током, способную вращаться вокруг горизонтальной оси, поместить между двумя полюсами магнита, то она начнет вращаться, поскольку полюсы будут отталкивать друг друга. На одной стороне рамки ток течет

в одном направлении, а на другой — в противоположном. Одна сторона рамки перемещается вниз, а другая — вверх. Рамка вращается против часовой стрелки вокруг своей оси. Коллектор изменяет направление тока в рамке каждый раз, когда вращающий момент достигает максимума или нуля. Это объясняет работу двигателя постоянного тока. Рамка или якорь вращается в магнитном поле. Поле может создаваться постоянным магнитом или электромагнитом. Коллектор изменяет направление тока, текущего через якорь. Отметим сходство между двигателем постоянного тока и генератором постоянного тока.

Устройство основных измерительных приборов использует принцип двигателя постоянного тока. Измерительный прибор состоит из постоянного магнита и вращающейся



катушки. Когда по катушке протекает ток, ее магнитное поле взаимодействует с полем постоянного магнита и заставляет катушку вращаться. Чем больше ток, текущий через катушку, тем сильнее создаваемое ею магнитное поле. Чем сильнее магнитное поле, тем на больший угол отклонится катушка. Для определения величины тока, протекающего через катушку, к ней прикреплена стрелка. Когда катушка вращается, с ней перемещается и стрелка. Стрелка перемещается вдоль проградуированной шкалы и показывает величину тока. Приборы этого типа используются в качестве аналоговых амперметров, вольтметров и омметров.

Проводник с током может отклоняться (перемещаться) магнитным полем. Но это отклоняется не сам проводник, а электроны,двигающиеся по нему. Поскольку электроны ограничены проводником, то перемещается также и проводник. Электроны могут перемещаться и в других средах. В телевизионной электронно-лучевой трубке электроны перемещаются в вакууме и ударяются в люминесцентный экран, заставляя его светиться. Пучок электронов создается электронной пушкой. При перемещении электронного пучка по поверхности экрана создается изображение. Для перемещения электронного пучка по экрану используются два магнитных поля. Одно магнитное поле перемещает пучок вверх и вниз, а второе — вправо и влево. Этот метод используется в телевидении, радиолокации, компьютерных дисплеях и в других случаях, когда необходимо получить изображение на экране.

9-4. Вопросы

1. Чем отличается генератор переменного тока от генератора постоянного тока?
2. Почему важны реле?
3. Как громкоговоритель воспроизводит звук?
4. Какой принцип лежит в основе работы двигателя постоянного тока и измерительного прибора?



5. Каким образом электромагнитное поле создает изображение на экране?

РЕЗЮМЕ

- Слово *магнит* произошло от слова магнетит, названия минерала, являющегося природным магнитом.
- Магнит может быть изготовлен из смеси мягкого железа с другим магнитом.
- Катушка, по которой протекает ток, представляет собой электромагнит.
- Наиболее часто встречающиеся формы постоянных магнитов — подковообразная, в виде бруска и в виде кольца.
- Разноименные магнитные полюсы притягиваются, а одноименные отталкиваются.
- Теория, объясняющая природу магнетизма в парамагнитных материалах, основана на вращении (спине) электронов, движущихся на орбитах вокруг атома.
- Теория ферромагнетизма основана на упорядоченной ориентации доменов.
- Силовые линии — это невидимые линии, окружающие магнит.
- Силовые линии образуют замкнутые кривые наименьшего возможного размера.
- Проницаемость — это способность материала воспринимать магнитные силовые линии.
- Когда по проводнику течет ток, его окружает магнитное поле.
- Направление силовых линий, окружающих проводник с током, можно определить, обхватив проводник левой рукой и направив большой палец в направлении тока. Остальные пальцы укажут направление силовых линий.
- Если два проводника с токами, текущими в одном направлении, поместить рядом, то их магнитные поля складываются.



- Сила электромагнита прямо пропорциональна количеству витков в катушке и величине протекающего по ней тока.
- Полярность электромагнита можно определить, обхватив катушку левой рукой так, чтобы пальцы указывали направление тока. Тогда большой палец укажет направление на Северный полюс электромагнита.
- *Остаточная намагниченность* — это способность материала сохранять магнитное поле.
- Электромагнитная индукция имеет место, когда проводник перемещается в магнитном поле.
- Закон Фарадея: индуцируемое напряжение (э.д.с. индукции) прямо пропорционально скорости, с которой проводник пересекает магнитные силовые линии.
- Для определения полярности индуцированного напряжения может быть использовано правило левой руки для генераторов.
- Генераторы постоянного и переменного тока преобразуют механическую энергию в электрическую.
- Реле — это электромеханический переключатель.
- Принципы электромагнетизма применяются для разработки и производства дверных звонков, соленоидов, головок звукозаписывающих устройств, громкоговорителей и при магнитной записи.
- Двигатели постоянного тока и измерительные приборы используют те же самые принципы.
- Электронные пучки могут отклоняться электромагнитным полем для получения изображения в телевидении, радиолокации и т.д.

Глава 9. САМОПРОВЕРКА

1. Как можно подтвердить доменную теорию магнетизма?
2. Какими методами можно увеличить силу электромагнита?
3. Объясните один цикл работы генератора постоянного тока.

Глава 10. ИНДУКТИВНОСТЬ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Объяснить принципы индуктивности.
- Дать определение основных величин измерения индуктивности.
- Описать основные типы катушек индуктивности.
- Дать определение полной индуктивности в последовательной и параллельной цепях.
- Дать объяснение постоянной времени L/R и ее связи с индуктивностью.

Когда по проводнику течет ток, вокруг него возникает магнитное поле. Это поле обладает энергией, величина которой пропорциональна индуктивности.

В этой главе обсуждается индуктивность и ее приложения в цепях постоянного тока. Более подробно об индуктивности рассказано в главе 16.

10-1. ИНДУКТИВНОСТЬ.

Индуктивность — это способность извлекать энергию из источника и сохранять ее в виде магнитного поля. Это свойство проводника, предотвращающее резкие изменения текущего через него тока. Например, если ток в катушке увеличивается, магнитное поле вокруг катушки расширяется. Если ток в катушке уменьшается, магнитное поле сжимается. Однако сжатие магнитного поля индуцирует в катушке напряжение, которое поддерживает ток. Таким образом, индуктивность позволяет энергии сохраняться в виде магнитного поля, зависящего от тока. Когда ток уменьшается, уменьшается и магнитное поле, возвращая в цепь запасенную энергию.



Единица, которой измеряется индуктивность называется генри (Гн). Она названа в честь американского физика Джозефа Генри (1797–1878). Генри — это такая индуктивность, которая требуется для индуцирования электродвижущей силы (э.д.с.) в 1 вольт при изменении тока в проводнике со скоростью 1 ампер в секунду. Генри — большая единица, значительно чаще используются миллигенри (мГн) и микрогенри (мкГн). Индуктивность обозначается символом L .

10-1. Вопросы

1. Дайте определение *индуктивности*.
2. В каких единицах измеряется индуктивность?
3. Дайте определение генри.
4. Какая буква используется для обозначения индуктивности?

10-2. КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ

Катушки индуктивности — это устройства, имеющие определенную **индуктивность**. Они состоят из провода, намотанного на сердечник, и классифицируются по материалу сердечника. Сердечник катушки может быть либо магнитным, либо немагнитным. На рис. 10-1 показано схематическое обозначение катушки индуктивности.

Катушки могут иметь как постоянную, так и изменяемую индуктивность. На рис. 10-2 показано схематическое обозначение катушки с переменной индуктивностью. Катушки с переменной индуктивностью содержат подстроечный сердечник. На рис. 10-3 показаны несколько типов катушек индуктивности, использующих подстроечный сердечник. Максимальная индуктивность регистрируется, когда сердечник полностью введен в катушку.



Рис. 10-1. Схематическое обозначение катушки индуктивности.



Рис. 10-2. Схематическое обозначение катушки с переменной индуктивностью



Катушки индуктивности с воздушным сердечником, или катушки без сердечника, используются в тех случаях, когда индуктивность не превышает 5 миллигенри. Они наматываются на керамические или композитные сердечники (рис. 10-4).

Сердечники из феррита или порошкообразного железа используются для индуктивностей до 200 миллигенри. Схематическое обозначение катушки с железным сердечником показано на рис. 10-5.

Тороидальные сердечники имеют кольцеобразную форму и позволяют получить высокую индуктивность при малых размерах (рис. 10-6). Их магнитное поле сосредоточено внутри сердечника.

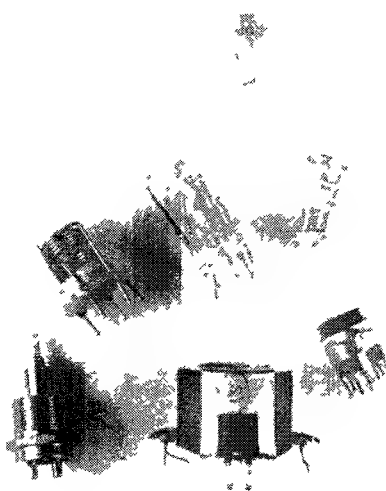


Рис. 10-3. Некоторые типы катушек индуктивности с возможностью регулирования индуктивности.

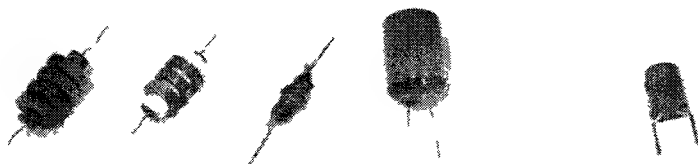


Рис. 10-4. Типы катушек индуктивности с воздушным сердечником.

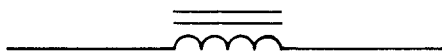


Рис. 10-5. Схематическое обозначение катушки индуктивности с железным сердечником.

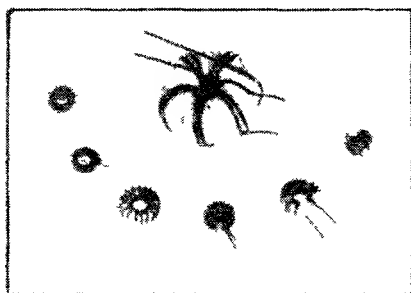


Рис. 10-6. Катушки индуктивности с тороидальным сердечником.

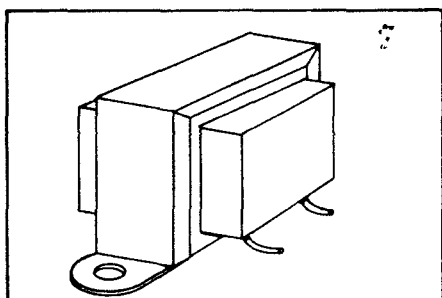


Рис. 10-7. Экранированная катушка индуктивности.

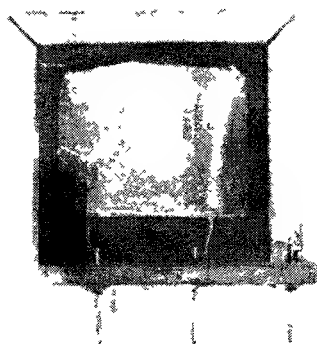


Рис. 10-8. Многослойная катушка индуктивности с железным сердечником.

Экранированные индуктивности заключены в корпус (экран), сделанный из магнитного материала для защиты их от влияния внешних магнитных полей (рис. 10-7).

Многослойные катушки индуктивности с железным сердечником используются для получения большой индуктив-



ности (рис. 10-8). Индуктивность этих катушек изменяется от 0,1 до 100 генри и зависит от величины тока, протекающего через катушку. Эти катушки иногда называют *дросселями*. Они используются в цепях фильтрации источников питания для удаления переменных составляющих выпрямленного постоянного тока. Они будут обсуждаться немного позднее.

Обычно катушки индуктивности имеют допуск $\pm 10\%$, но встречаются катушки с допуском менее, чем 1% . Катушки индуктивности, как и резисторы, могут соединяться последовательно, параллельно или последовательно-параллельно. Полная индуктивность нескольких катушек индуктивности, соединенных последовательно (катушки должны быть пространственно разделены для того, чтобы избежать взаимодействия их магнитных полей), равна сумме их индуктивностей:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n.$$

Если две или более катушек индуктивности соединены параллельно (без взаимодействия их магнитных полей), общую индуктивность можно найти с помощью формулы:

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}.$$

10-2. Вопросы

1. Что такое катушки индуктивности?
2. Нарисуйте схематические обозначения катушек с постоянной и переменной индуктивностью.
3. Как по другому называются многослойные катушки индуктивности с железным сердечником?
4. Напишите формулы для определения общей индуктивности
 - а. В последовательных цепях.
 - б. В параллельных цепях.



5. Какова общая индуктивность цепи с тремя катушками индуктивности 10 Гн, 3,5 Гн и 6 Гн, соединенными параллельно?

10-3. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ L/R

Постоянная времени L/R — это время, требуемое для увеличения тока в проводнике от нуля до 63,2% или уменьшения до 36,8% от максимального значения. RL цепь показана на рис. 10-9. L/R — обозначение, используемое для постоянной времени RL цепи:

$$t = \frac{L}{R},$$

где t — время в секундах, L — индуктивность в генри, R — сопротивление в омах.



Рис. 10-9. Цепь, используемая для определения постоянной времени L/R .

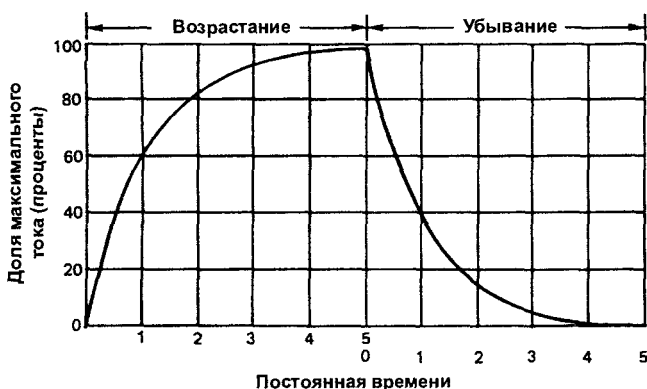


Рис. 10-10. Количество постоянных времени, требуемое для создания максимального магнитного поля или полного исчезновения магнитного поля в катушке индуктивности.



На рис. 10-10 показан график увеличения и уменьшения магнитного поля, как функции времени, причем масштабной единицей взята постоянная времени t . Требуется время, в пять раз большее постоянной времени для того, чтобы полностью передать энергию магнитному полю или создать максимальное магнитное поле. Такое же время требуется для того, чтобы магнитное поле полностью исчезло.

10-3. Вопросы

1. Что такое постоянная времени катушки индуктивности?
2. Как определяется постоянная времени?
3. Сколько постоянных времени требуется для того, чтобы создать максимальное магнитное поле катушки индуктивности?
4. Сколько постоянных времени требуется для того, чтобы магнитное поле катушки индуктивности полностью исчезло?
5. Какое время требуется, чтобы создать максимальное магнитное поле катушки индуктивностью 0,1 генри, соединенной последовательно с резистором 100000 Ом?

РЕЗЮМЕ

- Индуктивность — это способность сохранять энергию в виде магнитного поля.
- Единицей измерения индуктивности является генри (Гн).
- Для обозначения индуктивности используется буква L .
- Катушки индуктивности — это устройства, имеющие определенную индуктивность.
- Схематическим обозначением постоянной индуктивности является:





- Схематическим обозначением переменной индуктивности является:



- Катушки индуктивности бывают следующих типов: с воздушным сердечником, с сердечником из феррита или порошкообразного железа, с тороидальным сердечником, экранированные и многослойные с железным сердечником.
- Общая индуктивность катушек, соединенных последовательно, вычисляется по формуле:

$$L_T = L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n.$$

- Общая индуктивность катушек, соединенных параллельно, равна:

$$\frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} + \dots + \frac{1}{L_n}.$$

- Постоянная времени — это время, требуемое для увеличения тока от нуля до 63,2% или уменьшения его до 36,8% от максимального значения.
- Постоянная времени определяется формулой:

$$t = \frac{L}{R}.$$

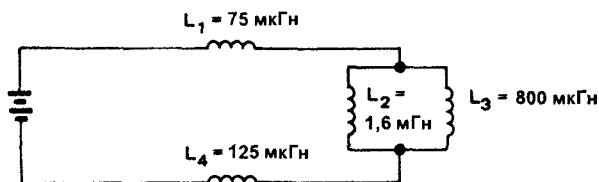
- Время, в пять раз большее постоянной времени, необходимо для создания максимального магнитного поля или полного исчезновения магнитного поля катушки индуктивности.

Глава 10. САМОПРОВЕРКА

1. Как можно увеличить магнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности?
2. Чему равна общая индуктивность изображенной ниже цепи?
3. Катушка индуктивности 500 мГн и резистор 10 кОм соединены последовательно и подключены к источнику тока 25 вольт. Каково будет напряжение на катушке ин-



дуктивности через 100 микросекунд после включения цели?



Глава 11. ЕМКОСТЬ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Объяснить, что такое емкость.
- Знать, в каких единицах измеряется емкость.
- Знать различные типы конденсаторов.
- Уметь определить общую емкость последовательной и параллельной цепей.
- Дать объяснение постоянной времени RC и ее связи с емкостью.

Емкость позволяет сохранять энергию в электростатическом поле. Емкость существует всегда, когда два проводника разделены изолятором.

В этой главе рассматривается емкость и ее применения в цепях постоянного тока. Более подробно емкость рассмотрена в главе 15.

11-1. ЕМКОСТЬ

Емкость — это способность устройства хранить электрическую энергию в электростатическом поле. **Конденсатор** — это устройство, которое обладает определенной емкостью. Конденсатор состоит из двух проводников, разделенных изолятором (рис. 11-1). Проводники называются *обкладками*, а изолятор — *диэлектриком*. На рис. 11-2 даны схематические изображения конденсаторов.

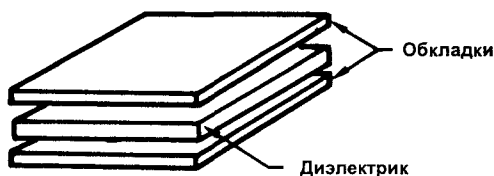
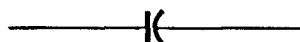


Рис. 11-1. Конденсатор состоит из двух обкладок (проводников), разделенных диэлектриком (изолятором).



ПОСТОЯННЫЙ КОНДЕНСАТОР



ПЕРЕМЕННЫЙ КОНДЕНСАТОР

Рис. 11-2. Схематическое обозначение конденсаторов.

Когда источник тока подсоединен к конденсатору, ток течет до тех пор пока конденсатор не зарядится. Конденсатор заряжается избытком электронов на одной обкладке (отрицательный заряд) и дефицитом электронов на другой обкладке (положительный заряд).

Диэлектрик предотвращает перемещение электронов между обкладками. Как только конденсатор зарядится, ток прекращается. Напряжение на конденсаторе равно напряжению источника тока.

Заряженный конденсатор может быть отключен от источника тока и использован как источник энергии. Однако как только конденсатор теряет энергию, напряжение на нем резко падает. В цепи постоянного тока конденсатор после начальной зарядки работает как *разомкнутая цепь*. Разомкнутая цепь — это цепь с бесконечным сопротивлением.

Предупреждение: так как конденсатор при отключении от источника тока может удерживать потенциал источника тока достаточно долго, обращайтесь со всеми конденсаторами, как с заряженными. Никогда не касайтесь обоих выводов конденсатора рукой до тех пор, пока не разрядите его путем закорачивания выводов. Конденсатор в цепи может удерживать потенциал неопределенно долго, если у него нет пути для разряда.

Количество энергии, сохраняемой в конденсаторе, пропорционально размеру конденсатора. Конденсаторы, используемые в учебных лабораториях, обычно малы и наносят небольшой удар током при разряде через тело. Однако если конденсатор большой и заряжен высоким напряжением, его удар может быть смертельным. С заряженными конденсаторами следует обращаться так же, как и с любыми другими источниками тока.

Основной единицей измерения емкости является **фарада** (Ф). *Фарада* — это такая емкость, которая может сохранить



1 кулон заряда при напряжении на конденсаторе 1 вольт. Фарада слишком большая единица для обычных целей, и поэтому обычно используются микрофарады (мкФ) и пикофарады (пФ). Для обозначения емкости используется буква С.

$$1 \text{ микрофарада} = 0,000001 \text{ или } \frac{1}{1000000} \text{ фарады,}$$

$$1 \text{ пикофарада} = 0,000000000001 \text{ или } \frac{1}{1000000000000} \text{ фарады.}$$

11-1. Вопросы

1. Что такое емкость?
2. Нарисуйте схематическое изображение емкости.
3. Какие предосторожности необходимо соблюдать при работе с конденсаторами?
4. В каких единицах измеряется емкость?
5. Какие единицы обычно используются для обозначения емкости конденсаторов?

11-2. КОНДЕНСАТОРЫ

На емкость конденсатора влияют четыре фактора:

1. Площадь обкладок
2. Расстояние между обкладками.
3. Тип диэлектрического материала.
4. Температура.

Конденсаторы бывают постоянные и переменные. **Постоянный конденсатор** имеет определенное значение емкости, которое не может быть изменено. Емкость **переменного конденсатора** можно изменять, изменяя либо расстояние между обкладками (подстроечный конденсатор), либо перекрытие между двумя наборами пластин (переменный конденсатор).

Емкость прямо пропорциональна площади обкладок. Например, увеличение площади обкладок в два раза в те же два раза увеличивает емкость, если, конечно, все другие факторы остаются неизменными.



Емкость обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. Другими словами, если обкладки раздвинуть, величина электрического поля между ними уменьшится.

Способность конденсаторов сохранять электрическую энергию зависит от электростатического поля между обкладками и искажения электронных орбит в диэлектрическом материале. Степень этого искажения зависит от природы диэлектрического материала и определяется его диэлектрической постоянной. *Диэлектрическая постоянная* — это мера эффективности материала как диэлектрика. Эта постоянная сравнивает способность материала к искажению электронных орбит и сохранению энергии в электрическом поле со способностью воздуха, диэлектрическая постоянная которого равна 1. Бумага имеет диэлектрическую постоянную от 2 до 3; слюда — от 5 до 6; а титан — от 90 до 170.

Температура конденсатора из всех четырех факторов имеет наименьшее значение. Для большинства приложений общего назначения рассматривать ее нет необходимости.

Конденсаторы бывают различных типов и конструкций в соответствии с требованиями электронной промышленности. *Электролитические конденсаторы* обладают большой емкостью при малых размерах и весе (рис. 11-3). Электролитические конденсаторы состоят из двух металлических обкладок из фольги, разделенных тонкой материей или другим гигроскопическим материалом, насыщенным химической пастой, называемой электролитом. Электролит является хорошим проводником и служит частью отрицательной обкладки. Диэлектрик образуется окислением положительной обкладки. Слой окисла является тонким и хорошим изолятором. Электролитический конденсатор является поляризованным, имеет положительный и отрицательный выводы. При включении электролитического конденсатора в цепь должна соблюдаться полярность.

Бумажные и пластиковые конденсаторы сконструированы как рулоны фольги, разделенной диэлектриком (рис. 11-4).



Бумажный диэлектрик имеет меньшее сопротивление, чем пластиковая диэлектрическая пленка, но пластиковая пленка в настоящее время используется чаще. Пластиковая пленка позволяет нанести металлическую пленку прямо на нее. Это уменьшает расстояние между обкладками, и в результате конденсатор получается компактнее.

Керамические дисковые конденсаторы популярны вследствие того, что их производство обходится очень дешево (рис. 11-5). Они используются в качестве емкостей от 0,1 микрофарады и меньше. Керамический материал является диэлектриком. Это выносливые, надежные конденсаторы для широкого применения.

Переменные конденсаторы также имеют различные размеры и формы (рис. 11-6). Переменные конденсаторы бывают выравнивающие, подстроечные и настроенные. Выравнивающие и подстроечные конденсаторы должны настраиваться специалистом. Настроенные конденсаторы могут настраиваться пользователем.

Подобно резисторам и катушкам индуктивности, конденсаторы могут соединяться последовательно, параллельно и последовательно-параллельно. Последовательное соединение конденсаторов эффективно увеличивает толщину диэлектрика. Это уменьшает общую емкость, так как емкость обратно пропорциональна расстоянию между обкладками. Общая емкость последовательно соединенных конденсаторов вычисляется подобно общему сопротивлению параллельно соединенных резисторов:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

Когда конденсаторы различной емкости соединяются последовательно, наименьший конденсатор заряжается до наивысшего напряжения.

Параллельное соединение конденсаторов эффективно увеличивает площадь обкладок. Это приводит к тому, что общая емкость равна сумме отдельных емкостей:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

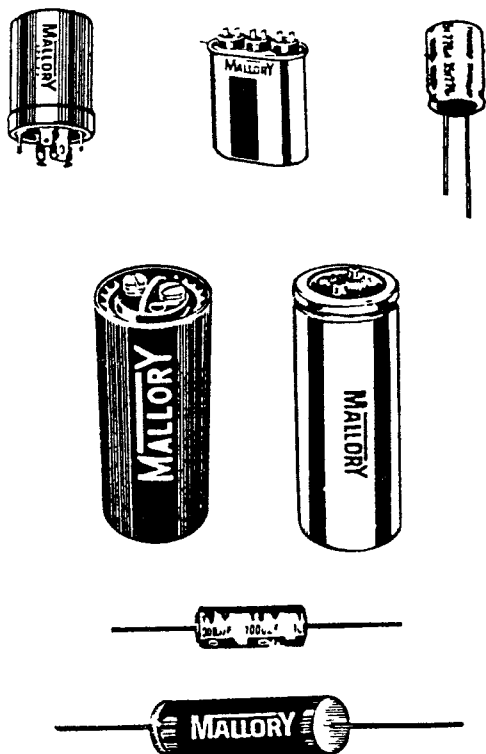


Рис. 11-3. Электролитические конденсаторы.

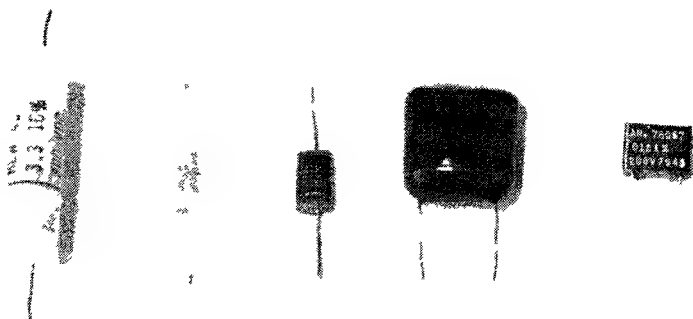


Рис. 11-4. Бумажные и пластиковые конденсаторы

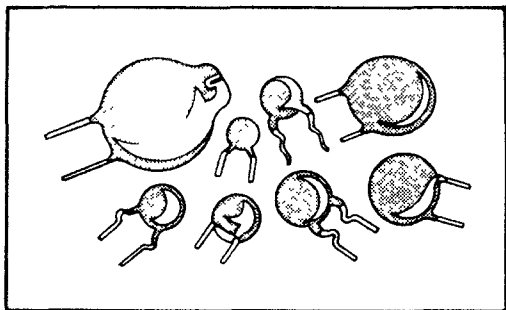


Рис. 11-5. Керамические дисковые конденсаторы.

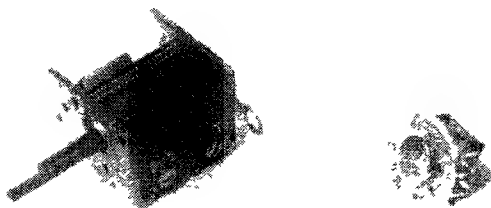


Рис. 11-6. Переменные конденсаторы.

Параллельно соединенные конденсаторы все заряжаются до одинакового напряжения.

11-2. Вопросы

1. Какие четыре фактора влияют на емкость конденсатора?
2. Каковы преимущества электролитических конденсаторов?
3. Как иначе называются переменные конденсаторы?
4. По какой формуле определяется общая емкость последовательной цепи?
5. По какой формуле определяется общая емкость параллельной цепи?

11-3. ПОСТОЯННАЯ ВРЕМЕНИ ЦЕПИ RC

Постоянная времени цепи RC отражает соотношение между временем, сопротивлением и емкостью. На рис. 11-7

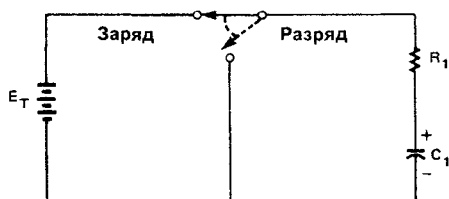


Рис. 11-7. Цепь, используемая для определения постоянной времени RC.

изображена RC цепь. Время, необходимое для заряда и разряда конденсатора прямо пропорционально величине сопротивления и емкости. Постоянная времени цепи определяет время, требуемое для того, чтобы конденсатор зарядился до 63,2% от величины приложенного напряжения или разрядился на 63,2% от этой величины. Постоянная времени определяется следующей формулой:

$$t = RC,$$

где t — время в секундах, R — сопротивление в омах, C — емкость в фарадах.

ПРИМЕР: Чему равна постоянная времени цепи, состоящей из конденсатора емкостью в 1 микрофараду и резистора величиной 1 МОм?

Дано:

$$C = 1 \text{ мкФ}$$

$$R = 1 \text{ МОм}$$

$$t = ?$$

Решение:

$$t = RC$$

$$t = (1000000)(0,000001)$$

$$t = 1 \text{ сек.}$$

Постоянная времени цепи не равна времени, требуемого для полного заряда или разряда конденсатора. Рис. 11-8 показывает, сколько постоянных времени требуется для полного заряда и разряда конденсатора. Заметим, что для полного заряда или разряда конденсатора требуется время, примерно в пять раз большее постоянной времени цепи.

11-3. Вопросы

1. Что такое постоянная времени цепи RC?
2. Как определяется постоянная времени цепи RC?
3. Сколько постоянных времени цепи требуется для полного заряда или разряда конденсатора?

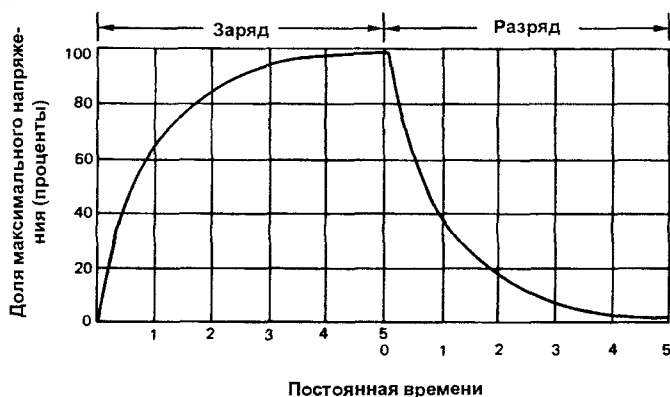
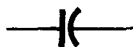


Рис. 11-8. График зависимости заряда и разряда конденсатора от времени.

4. Конденсаторы емкостью 1 мкФ и 0,1 мкФ соединены последовательно. Чему равна полная емкость цепи?
5. Конденсатор емкостью 0,015 мкФ заряжен до 25 вольт. Чему будет равно напряжение на нем через 25 миллисекунд после подсоединения к его выводам резистора 2 МОм?

РЕЗЮМЕ

- Емкость — это способность сохранять электрическую энергию в электростатическом поле.
- Конденсатор состоит из двух проводников, разделенных изолятором.
- Схематическое обозначение постоянного конденсатора следующее:



- Схематическое обозначение переменного конденсатора следующее:



- Единицей измерения емкости является фарада (Ф).



- Поскольку фарада — это большая единица, обычно используются микрофарады (мкФ) и пикофарады (пФ).
- Емкость обозначается буквой C .
- На емкость влияют следующие факторы:
 - а. Площадь обкладок конденсатора.
 - б. Расстояние между обкладками.
 - в. Тип диэлектрического материала
 - г. Температура.
- Конденсаторы бывают следующих типов: электролитические, бумажные, пластиковые и керамические.
- Емкость последовательно соединенных конденсаторов вычисляется по следующей формуле:
- Емкость параллельно соединенных конденсаторов вычисляется по следующей формуле:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots + \frac{1}{C_n}.$$

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + \dots + C_n.$$

- Постоянная времени цепи RC определяется формулой:

$$t = RC.$$

- Для полного заряда или разряда конденсатора требуется время, примерно в пять раз больше постоянной времени цепи.

Глава 11. САМОПРОВЕРКА

1. Где в конденсаторе сохраняется заряд?
2. Четыре конденсатора с емкостями 1,5 мкФ, 0,05 мкФ, 2000 пФ и 25 пФ соединены последовательно. Чему равна полная емкость цепи?
3. Четыре конденсатора с емкостями 1,5 мкФ, 0,05 мкФ, 2000 пФ и 25 пФ соединены параллельно. Чему равна полная емкость цепи?

Раздел 2.

ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА



Специальность — электрик

Электрик может специализироваться в изготовлении аппаратуры, в ее эксплуатации или и в том, и в другом. Электрики собирают, устанавливают и эксплуатируют различное оборудование: нагревательное, осветительное, энергоснабжающее, кондиционирующее и холодильное.

Работа электрика является активной и напряженной. Электрик рискует получить поражение электрическим током, упасть или порезаться об острые предметы. Электрик должен уметь пользоваться защитным оборудованием и одеждой для того, чтобы избежать травм, и неукоснительно соблюдать правила техники безопасности.

Большая часть электриков подготавливается на основе учебных программ, которые позволяют им получать квалификацию по эксплуатации и по изготовлению различного оборудования.

К 2000 году ожидается увеличение потребности в электриках. По мере роста населения и экономики возрастет потребность в электриках для эксплуатации электрических систем, используемых в промышленности и дома.

Глава 12. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать получение напряжения переменного тока с помощью генератора переменного тока.
- Дать определения *цикла, герца, синусоиды, периода и частоты*.
- Описать части генератора переменного тока.
- Дать определения *пикового значения, полного размаха колебания и эффективного или среднеквадратичного значения*.
- Объяснить соотношение между временем и частотой.
- Описать три основных вида несинусоидальных сигналов.
- Знать, что несинусоидальный сигнал имеет основную частоты и гармоники.

Переменный ток широко используется в настоящее время. В отличие от постоянного тока, который течет только в одном направлении, переменный ток периодически изменяет свое направление. Переменный ток сначала течет в одном направлении, а потом меняет направление и течет в противоположном.

Переменный ток легче генерировать и передавать на большие расстояния. Генераторы переменного тока проще и более экономичны в работе. Напряжение переменного тока может быть увеличено или уменьшено с помощью трансформатора с очень малой потерей мощности. Кроме того, переменный ток легко преобразуется в постоянный. Переменный ток можно использовать для передачи информации из одного пункта в другой по линиям передачи, а также преобразовать в электромагнитные волны и передавать и принимать с помощью антенных систем.



В этой главе описываются способы производства и важные электрические характеристики переменного тока.

12-1. ПОЛУЧЕНИЕ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Генератор переменного тока преобразует механическую энергию в электрическую. Генератор переменного тока вырабатывает переменное напряжение, используя принципы электромагнитной индукции. Электромагнитная индукция — это процесс индуцирования напряжения в проводнике, движущемся в магнитном поле.

Как описано в главе 9, правило левой руки для генераторов может быть использовано для определения направления тока в проводнике, который перемещается в магнитном поле: когда большой палец указывает направление движения проводника, а указательный (расположенный под прямым углом к большому) указывает направление магнитных силовых линий от севера к югу, то средний палец (расположенный под прямым углом к двум другим) укажет направление тока в проводнике. Максимальное напряжение индуцируется, когда проводник движется перпендикулярно силовым линиям. Если же проводник перемещается параллельно силовым линиям, напряжение не индуцируется.

На рис. 12-1 показана рамка, вращающаяся в магнитном поле. В положении А рамка (т.е. ее горизонтальные проводники) перемещается параллельно силовым линиям, и напряжение при этом не индуцируется. Повернувшись в положение Б, рамка при движении пересекает максимальное число магнитных силовых линий и, следовательно, индуцируется максимальное напряжение. При перемещении рамки в положение В количество пересекаемых силовых линий уменьшается, и индуцированное напряжение уменьшается также. Поворот рамки из положения А в положение В представляет собой поворот на 180 градусов. Перемещение рамки в положение Г приводит к возникновению тока противоположного направления. Как и в предыдущем случае, максимальное напряжение индуцируется,

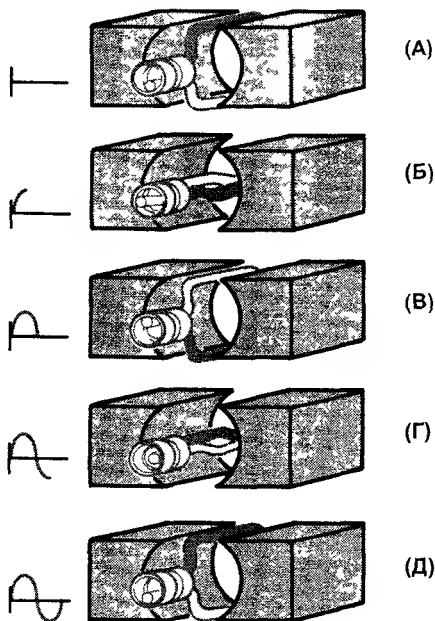


Рис. 12-1. Генератор переменного тока, индуцирующий выходное напряжение.

когда плоскость рамки находится под прямым углом к силовым линиям. При возвращении рамки в исходное положение Д индуцируемое напряжение падает до нуля.

Каждый раз, когда рамка генератора переменного тока делает полный оборот, говорят о завершении одного *цикла*. Величина выходного напряжения за время одного цик-

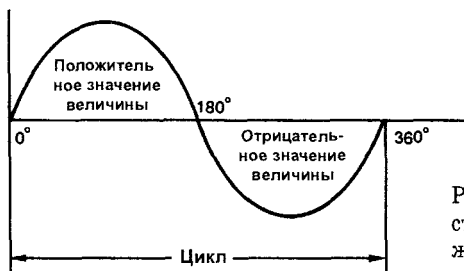


Рис. 12-2. Каждый цикл состоит из чередования положительных и отрицательных значений величин.

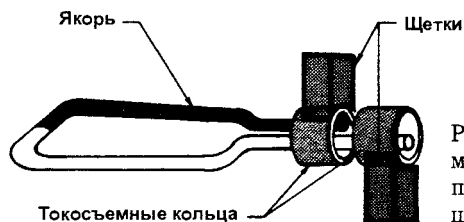


Рис. 12-3. Напряжение снимается с якоря генератора переменного тока с помощью токоъемных колец.

ла возвращается к исходному значению. Время, в течение которого совершается полный цикл, называется **периодом**. Аналогично, генератор вырабатывает в замкнутой цепи выходной ток, имеющий периодическую форму. Каждую половину периода происходит изменение полярности напряжения (рис. 12-2). Напряжение имеет одну полярность в течение половины цикла (периода) и противоположную полярность в течение следующей половины цикла (периода). В первую половину периода вырабатывается напряжение положительной полярности, во вторую половину периода вырабатывается напряжение отрицательной полярности. Один цикл в секунду определяется как **герц**.

Вращающаяся рамка называется **якорем**. Напряжение переменного тока, индуцируемое во вращающемся якоре, снимается с концов рамки с помощью скользящих контактов, расположенных с двух сторон якоря (рис. 12-3). Два металлических кольца, называемых **токоъемными кольцами**, подсоединены к двум концам рамки. Скользящие щетки, прилегающие к токоъемным кольцам, снимают переменное напряжение. На практике генератор переменного тока должен содержать много рамок для увеличения амплитуды индуцируемого напряжения.

Форма вырабатываемого генератором переменного тока напряжения называется **синусоидой** (рис. 12-4). Синусоида является основной и наиболее широко используемой из всех форм переменного тока. Ее можно получить как механическим, так и электронным методом. И напряжение, и ток изменяются в виде синусоиды.

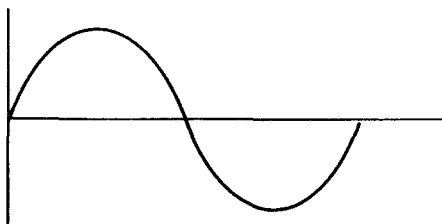


Рис 12-4. Синусоида — основная форма переменного тока.

12-1. Вопросы

1. В чем функция генератора переменного тока?
2. Объясните, как работает генератор переменного тока.
3. Дайте определения следующих терминов:
 - а. Цикл
 - б. Период
 - в. Герц
 - г. Синусоида
4. Опишите главные части генератора переменного тока.
5. В чем разница между двумя половинами периода?

12-2. ВЕЛИЧИНА ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Каждая точка синусоиды характеризуется двумя параметрами. Один из них — угол, на который повернулся якорь. Второй указывает амплитуду индуцируемой величины. **Амплитуда** — это максимальное значение переменного тока или синусоиды. Существует несколько методов определения этих значений.

Пиковое значение синусоиды — это наибольшее значение функции в течение периода (рис. 12-5). Существуют два

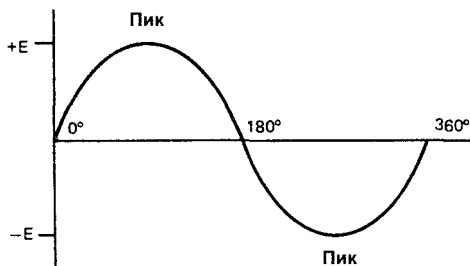


Рис. 12-5. Пиковое значение синусоиды — это точка ее наибольшего значения. Пиковое значение может быть как положительным, так и отрицательным.

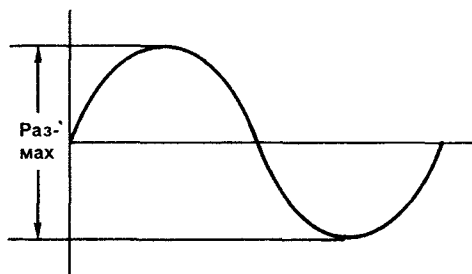


Рис. 12-6. Размах можно определить как сумму абсолютных величин пиковых значений разного знака.

пиковых значения — одно положительное, а другое отрицательное, они равны по абсолютной величине.

Значение **полного размаха синусоиды** означает вертикальное расстояние между двумя пиковыми значениями (рис. 12-6). Значение полного размаха можно определить сложением абсолютных значений пиковых величин.

Эффективное значение переменного тока — это такое значение постоянного тока, при котором на данном сопротивлении выделяется столько же тепла, что и при переменном токе. Эффективное значение можно определить, вычислив среднеквадратичное значение, поэтому эффективное значение часто называют **среднеквадратичным**. Вычисление среднеквадратичного значения показывает, что эффективное значение синусоиды равно 0,707 от пикового значения. Когда указывается значение переменного тока или напряжения без каких-либо уточнений, предполагается, что это эффективное значение. Большинство измерительных приборов проградуировано в эффективных значениях тока или напряжения.

$$E_{\text{эфф}} = 0,707 E_{\text{макс}},$$

где $E_{\text{эфф}}$ — эффективное значение напряжения, $E_{\text{макс}}$ — максимальное или амплитудное значение напряжения.

$$I_{\text{эфф}} = 0,707 I_{\text{макс}},$$

где $I_{\text{эфф}}$ — эффективное значение тока, $I_{\text{макс}}$ — максимальное или амплитудное значение тока.



ПРИМЕР: Синусоида тока имеет максимальное (пиковое) значение 10 ампер. Чему равно эффективное значение?

Дано:

$$I_{\text{эфф.}} = ?$$

$$I_{\text{макс.}} = 10 \text{ А.}$$

Решение:

$$I_{\text{эфф.}} = 0,707 I_{\text{макс.}} = (0,707)(10)$$

$$I_{\text{эфф.}} = 7,07 \text{ А.}$$

ПРИМЕР: Синусоида напряжения имеет эффективное значение 40 вольт. Чему равно максимальное (пиковое) значение синусоиды?

Дано:

$$E_{\text{макс.}} = ?$$

$$E_{\text{эфф.}} = 40 \text{ В.}$$

Решение:

$$E_{\text{эфф.}} = 0,707 E_{\text{макс.}}$$

$$40 = 0,707 E_{\text{макс.}}$$

$$E_{\text{макс.}} = 56,58 \text{ В.}$$

Время, требуемое для завершения одного цикла синусоиды называется **периодом**. Период обычно измеряется в секундах. Для обозначения периода используется буква t .

Количество циклов, совершаемых за заданный промежуток времени называется **частотой**. Частота синусоиды переменного тока обычно выражается в количестве циклов за секунду. Единицей частоты является *герц*. Один герц равен одному циклу в секунду.

Период синусоиды обратно пропорционален ее частоте. Чем выше частота, тем короче период. Соотношение между частотой и периодом синусоиды выражается следующими формулами:

$$f = \frac{1}{t},$$

$$t = \frac{1}{f},$$

где f — частота, а t — период.

ПРИМЕР: Чему равна частота синусоиды с периодом 0,05 секунд?

Дано:

$$f = ?$$

$$t = 0,05 \text{ с.}$$

Решение:

$$f = \frac{1}{t} = \frac{1}{0,05}$$



$$f = 20 \text{ Гц.}$$

ПРИМЕР: Если синусоида имеет частоту 60 герц, то чему равен ее период?

Дано:

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$t = ?$$

Решение:

$$t = \frac{1}{f} = \frac{1}{60}$$

$$t = 0,0167 \text{ с или } 16,7 \text{ мс.}$$

12-2. Вопросы

1. Дайте определения следующих величин:
 - а. Пиковое (максимальное) значение;
 - б. Размах синусоиды;
 - в. Эффективное значение;
 - г. Среднеквадратичное значение.
2. Синусоида напряжения имеет пиковое значение 125 вольт. Чему равно эффективное значение?
3. Каково соотношение между временем и частотой?
4. Синусоида тока имеет эффективное значение 10 ампер. Чему равно ее пиковое значение?
5. Чему равен период синусоиды с частотой 400 герц?

12-3. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ КОЛЕБАНИЯ

В большинстве случаев форма переменного тока бывает синусоидальной. Однако в электронике используются не только синусоидальные колебания. Колебания, форма которых отличается от синусоиды, называются несинусоидальными периодическими колебаниями. Несинусоидальные колебания генерируются специальными электронными цепями.

На рисунках 12-7, 12-8 и 12-9 изображены три основных вида несинусоидальных колебаний. Они могут представлять и ток, и напряжение. На рис. 12-7 изображены прямоугольные колебания, названные так потому, что положительные и отрицательные прямоугольные импульсы чередуются. Это указывает на то, что ток или напряжение

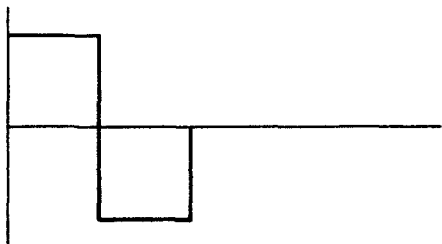


Рис. 12-7. Колебание прямоугольной формы.

мгновенно достигают максимального значения и остаются такими в течение половины периода. Когда полярность изменяется, ток или напряжение мгновенно достигают противоположного пикового значения и остаются неизменными до конца следующей половины периода. **Ширина импульса** — это отрезок времени, в течение которого напряжение имеет свое пиковое или максимальное значение. Прямоугольное колебание очень полезно как электронный сигнал, так как его характеристики могут быть легко изменены.

На рис. 12-8 показан один период колебания треугольной формы. В течение первой половины периода сигнал возрастает по линейному закону от нуля до пикового значения, а затем опять уменьшается до нуля. В течение второй половины периода сигнал продолжает уменьшаться по линейному закону в отрицательном направлении до пикового значения, а после этого опять возрастает до нуля. Треугольные колебания используются главным образом как электронные сигналы.

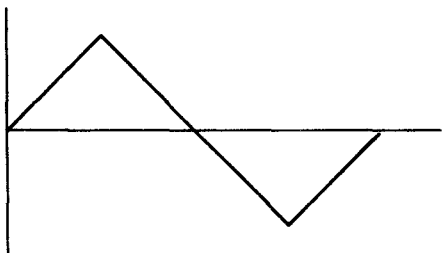


Рис. 12-8. Колебание треугольной формы

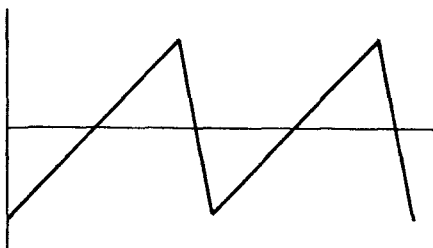


Рис. 12-9. Колебание пилообразной формы.

На рис. 12-9 показаны пилообразные колебания. Пилообразное колебание — это частный случай треугольного колебания. Сначала величина напряжения или тока возрастает по линейному закону, а после этого быстро падает до своего отрицательного пикового значения. Участок с положительным наклоном имеет относительно большую длительность и меньший по абсолютной величине угол наклона к оси времени, чем короткий участок. Пилообразные сигналы используются для переключения операций в электронных цепях. В телевизорах и осциллографах они используются для развертки электронного луча по экрану для создания изображения.

Импульсные колебания и другие несинусоидальные сигналы могут описываться двумя способами. Один метод рассматривает несинусоидальные сигналы как сумму скачкообразных изменений напряжения, следующих через некоторый интервал времени друг за другом. Второй метод рассматривает сигнал как алгебраическую сумму бесконечного числа синусоид, имеющих различные частоты и амплитуды. Этот метод полезен при расчете усилителей. Если усилитель не может пропустить все синусоидальные частоты, то он искажает сигнал.

Несинусоидальные сигналы состоят из колебаний основной частоты и гармоник. **Основная частота** соответствует скорости повторения сигнала. **Гармоники** являются синусоидами с более высокими частотами, которые кратны основной частоте. *Четные гармоники* имеют частоты, которые являются произведениями четных чисел и основной частоты. *Нечетные гармоники* имеют частоты,



которые являются произведениями нечетных чисел и основной частоты.

Прямоугольные колебания состоят из колебаний основной частоты и всех нечетных гармоник.

Треугольные колебания также состоят из колебаний основной частоты и всех нечетных гармоник, но, в отличие от прямоугольных колебаний, нечетные гармоники сдвинуты по фазе на 180 градусов относительно колебания основной частоты.

Пилообразные колебания содержат как четные, так и нечетные гармоники. Четные гармоники сдвинуты на 180 градусов по фазе относительно нечетных гармоник.

12-3. Вопросы

1. Что такое несинусоидальные колебания?
2. Нарисуйте два цикла (периода):
 - а. Прямоугольного колебания;
 - б. Треугольного колебания;
 - в. Пилообразного колебания.
3. Где применяются эти несинусоидальные колебания?
4. Опишите основную частоту и гармоники трех различных несинусоидальных колебаний.

РЕЗЮМЕ

- Переменный ток — это наиболее широко используемый в технике тип тока.
- Переменный ток представляет собой ток, текущий сначала в одном направлении, а затем в противоположном.
- Один оборот якоря генератора переменного тока называется циклом.
- Герц — это один цикл в секунду.
- Форма переменного тока, вырабатываемого генератором, называется синусоидой.
- Пиковое значение синусоиды — это наибольшее значение функции за время периода.



- Размах синусоиды — это вертикальное расстояние между пиками противоположного знака.
- Эффективное значение переменного тока — это такое значение постоянного тока, при котором на данном сопротивлении выделяется столько же тепла, что и при переменном токе.
- Эффективное значение можно определить, вычислив среднеквадратичное значение величины.
- Среднеквадратичное значение синусоиды равно 0,707 от пикового:

$$E_{\text{эфф}} = 0,707 E_{\text{макс}},$$

$$I_{\text{эфф}} = 0,707 I_{\text{макс}}.$$

- Время, необходимое для завершения одного цикла синусоиды, называется периодом (t).
- Количество циклов, совершаемых за заданный промежуток времени, называется частотой (f).
- Соотношение между частотой и периодом синусоиды выражается следующей формулой:

$$f = \frac{1}{t}.$$

- Прямоугольные колебания состоят из колебаний основной частоты и всех нечетных гармоник.
- Треугольные колебания состоят из колебаний основной частоты и всех нечетных гармоник, сдвинутых по фазе на 180 градусов относительно основной частоты.
- Пилообразные колебания содержат как четные, так и нечетные гармоники. Четные гармоники сдвинуты на 180 градусов по фазе относительно нечетных гармоник.

Глава 12. САМОПРОВЕРКА

1. Что надо сделать для наблюдения электромагнитной индукции?
2. Объясните, как правило левой руки применяется к генераторам переменного тока?



3. Дайте определение полного размаха колебаний.
4. Как определяется эффективное значение переменного тока?
5. Нарисуйте примеры трех несинусоидальных колебаний, которые могут представлять и ток и напряжение.
6. Почему при изучении несинусоидальных колебаний важны гармоники?

Глава 13.

ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить типы измерительных приборов, пригодных для измерений переменного тока.
- Перечислить системы измерительных приборов, используемых для измерений переменного тока.
- Объяснить функции осциллографа.
- Перечислить основные части осциллографа и объяснить их назначение.
- Продемонстрировать правильную установку осциллографа.
- Рассказать, как использовать осциллограф для проведения измерений.
- Объяснить, как работает частотомер.
- Перечислить основные части частотомера.

Измерения силы тока, напряжения, сопротивления, мощности и частоты переменного тока необходимы при работе и ремонте цепей переменного тока и различных устройств.

В этой главе описано наиболее важное тестирующее оборудование, используемое для проведения различных измерений переменного тока.

13-1. ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Приборы с *перемещающейся катушкой* — это приборы магнитоэлектрической системы. Аналоговый измерительный прибор, изображенный на рис. 13-1 — это прибор с перемещающейся катушкой. Цифровые приборы, показания которых легко читаются (рис. 13-2), в последнее время

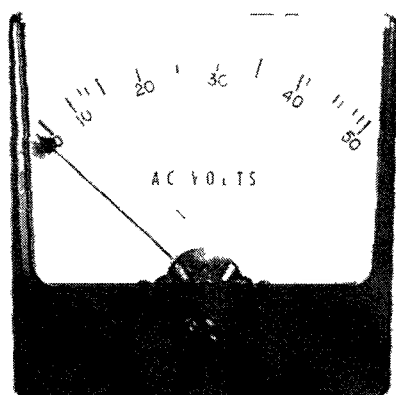


Рис. 13-1. Аналоговый измерительный прибор, используемый для измерений величины переменного тока

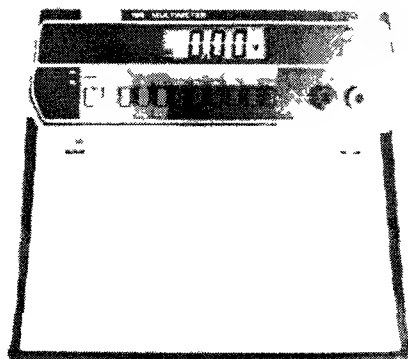


Рис. 13-2. Цифровой измерительный прибор, используемый для измерений величины переменного тока.

заменяют аналоговые приборы. Однако большинство школ и предприятий все еще используют аналоговые приборы.

Приборы магнитоэлектрической системы рассчитаны на измерение постоянного тока. Для того чтобы с помощью этого прибора измерить переменный ток, его сначала надо преобразовать в постоянный. Это осуществляется с помощью устройства на диодах, которое называется *выпрямителем*. Процесс преобразования переменного тока в постоянный называется **выпрямлением**. Выпрямители размещаются между входом прибора и измерительной системой и позволяют протекать току только в одном направлении

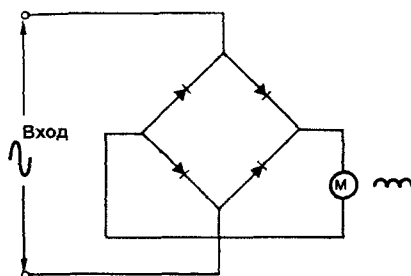


Рис. 13-3. Выпрямители, используемые для преобразования переменного тока в постоянный перед подачей его на измерительный прибор магнитоэлектрической системы.

(рис. 13-3). Выпрямители преобразуют синусоидальный ток в пульсирующий постоянный ток, который поступает на измерительный прибор.

Измерительный прибор переменного тока второго типа использует перемещение железных лопастей (рис. 13-4). Этот прибор называется прибором электромагнитной системы. Он не требует преобразования переменного тока в постоянный и состоит из двух железных лопастей, размещенных внутри катушки. Одна лопасть неподвижна, а другая может вращаться. Стрелка прибора прикреплена к подвижной лопасти и перемещается пропорционально среднеквадратичному значению тока, текущего по катушке. Магнитное поле катушки индуцирует северный и южный полюсы на железных лопатках. Вследствие того, что одноименные полюсы отталкиваются, а обе лопасти имеют одинаковую полярность, они отталкиваются друг от друга.

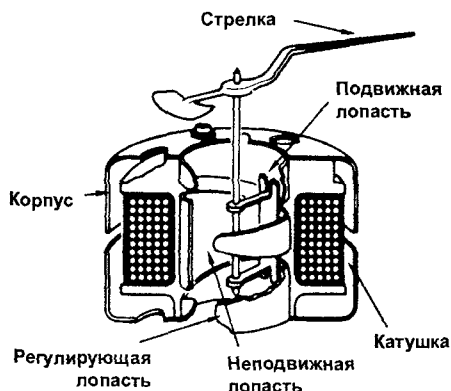


Рис. 13-4. Измерительный прибор электромагнитной системы, использующий железные лопасти, не требует преобразования переменного тока в постоянный.



Перемещение железной лопасти, соответствующее отклонению стрелки на всю шкалу, требует большего тока, чем для соответствующего перемещения катушки в приборах магнитоэлектрической системы. По этой причине приборы электромагнитной системы редко применяются в цепях со слабыми токами. Приборы электромагнитной системы допускают большую погрешность при измерении переменных токов с частотами свыше 100 герц. Они используются преимущественно на частоте 60 (50) герц.

Работа измерительных клещей (рис. 13-5) основана на том, что переменный ток, протекающий по проводнику, создает магнитное поле, изменяющееся при изменении тока. Каждый раз, когда переменный ток изменяет полярность, магнитное поле меняет направление. Измерительные клещи используют трансформатор с размыкающимся сердечником. Это позволяет разомкнуть сердечник и обхватить им проводник. На конце сердечника находится катушка, которую пересекают магнитные силовые линии. Благодаря этому в катушке индуцируется переменное напряжение. Это переменное напряжение должно быть выпрямлено перед подачей на измерительный прибор, обычно магнитоэлектрической системы. Измерительные клещи используются для измерения больших переменных токов. Ток, те-



Рис. 13-5. Работа измерительных клещей основана на том, что ток, текущий по проводнику, создает вокруг него магнитное поле.



кущий по проводнику, должен быть достаточно большим для того, чтобы создать достаточно сильное магнитное поле, которое сможет индуцировать ток в катушке измерительных клещей.

Основным назначением приборов для измерения переменного тока является измерение токов. Однако эти приборы могут также использоваться для измерения переменного напряжения и мощности. Поскольку переменный ток периодически меняет свое направление, полярность включения прибора в цепь переменного тока не имеет значения. Однако для измерения тока измерительный прибор должен включаться в цепь последовательно. При измерении напряжения измерительный прибор должен подключаться к цепи параллельно.

Вы всегда должны быть уверены, что измеряемые ток или напряжение лежат в пределах измерения прибора. Для перестраховки неизменно начинайте измерения с наивысшего предела, а потом переходите на более подходящую шкалу.

13-1. Вопросы

1. Как приборы магнитоэлектрической системы используются для измерения переменного напряжения?
2. Почему приборы электромагнитной системы предпочтительнее для измерения переменных токов и напряжений?
3. Объясните принцип, лежащий в основе работы измерительных клещей.
4. Нарисуйте цепь, показывающую, как надо подсоединять амперметр переменного тока.
5. Опишите правильный способ подключения вольтметра переменного тока к цепи (включая при возможности установки переключателей).

13-2. ОСЦИЛЛОГРАФЫ

Осциллограф является наиболее универсальной частью оборудования, применяемого для работы с электронными

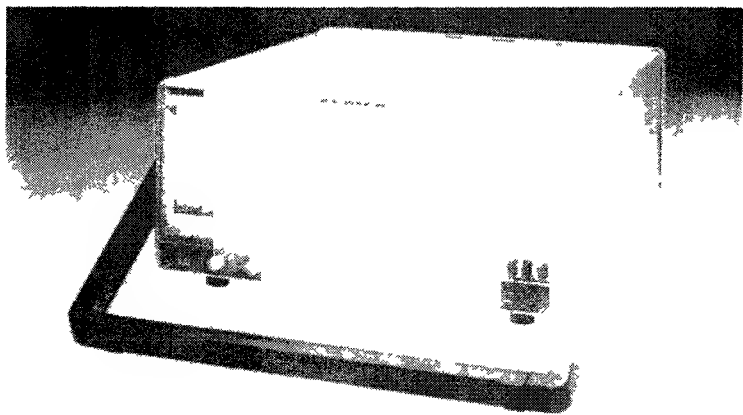


Рис. 13-6. Осциллограф является наиболее универсальной частью оборудования, доступного специалисту.

цепями (рис. 13-6). Он обеспечивает визуальное отображение того, что происходит в цепи.

Осциллограф показывает изменение напряжения в электронной цепи как функцию времени и позволяет измерить следующие параметры:

1. Частоту сигнала.
2. Продолжительность сигнала.
3. Фазовые соотношения между сигналами.
4. Форму сигнала.
5. Амплитуду сигнала.

Основными частями осциллографа являются: электронно-лучевая трубка (ЭЛТ), генератор развертки, усилители горизонтального и вертикального отклонения, блок питания (рис. 13-7).

Генератор развертки вырабатывает пилообразное напряжение, подаваемое на вход усилителя горизонтального отклонения. Усилители горизонтального и вертикального отклонения увеличивают амплитуду входного напряжения до уровня, способного отклонять электронный пучок в электронно-лучевой трубке. Блок питания обеспечивает по-

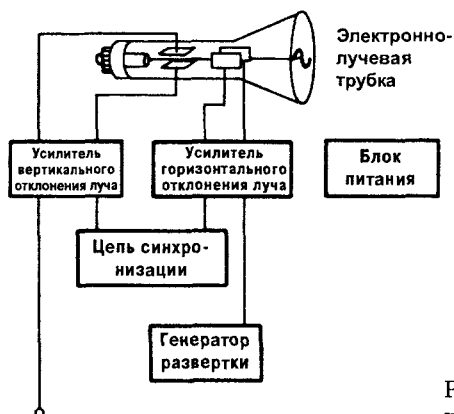


Рис. 13-7. Блок-схема основных частей осциллографа.

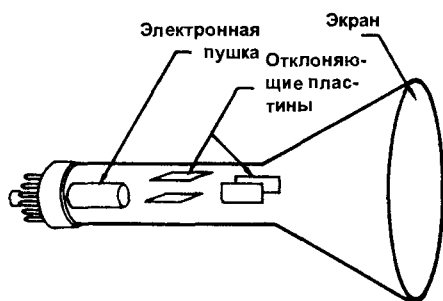


Рис. 13-8. Основные части электронно-лучевой трубки (ЭЛТ).

стоянное напряжение для работы усилителей и электронно-лучевой трубки.

Электронно-лучевая трубка состоит из трех частей: экрана, покрытого люминофором, отклоняющих пластин и электронной пушки. (рис. 13-8). Люминофор, находящийся на экране, испускает свет, когда в него ударяются электроны. Электронная пушка создает пучок электронов, который ударяется об экран. Отклоняющие пластины изменяют направление электронного пучка на пути к экрану. Горизонтальные отклоняющие пластины соединены с генератором развертки и перемещают электронный пучок вправо и влево, по экрану. Усилитель вертикального отклонения связан с входным сигналом и управляет его амплитудой.

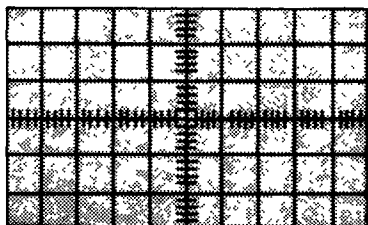


Рис. 13-9. Координатная сетка на экране осциллографа.

С помощью градуировки в сантиметрах по вертикальной и горизонтальной осям (рис. 13-9), осциллограф можно откалибровать с помощью известного напряжения, перед тем как измерять неизвестный сигнал. После этого при подаче на вход осциллографа неизвестного сигнала его амплитуда может быть измерена. Вместо того, чтобы градуировать лицевую поверхность ЭЛТ, осциллографы снабжают накладными координатными сетками, которые размещаются перед экраном ЭЛТ.

Выключатель питания осциллографа обычно расположен на передней панели (рис. 13-10). Это может быть тумблер, кнопка или вращающийся выключатель. Он может

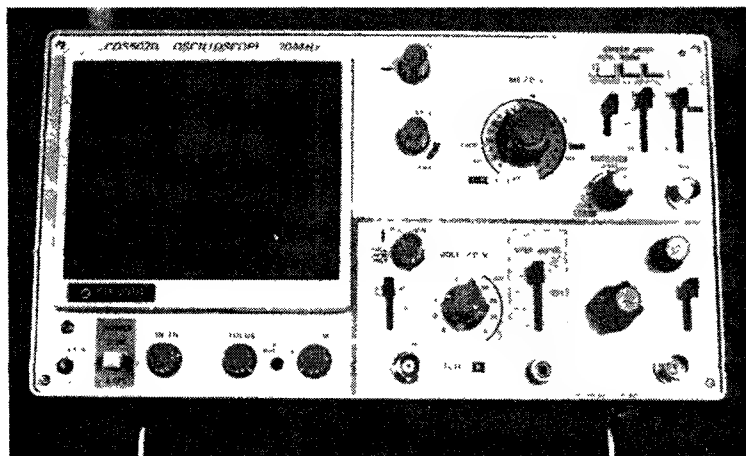


Рис. 13-10. На передней панели осциллографа находятся органы управления.



быть отдельным или совмещенным с другим переключателем. Его назначение — включать сетевое напряжение для работы осциллографа.

Регулятор интенсивности (яркости) используется для управления электронным пучком в ЭЛТ. Вращение этого регулятора позволяет отрегулировать электронный пучок для получения желаемой яркости. **Предупреждение: устанавливайте яркость как можно более низкой. Слишком большая яркость в течение достаточно долгого времени может нанести повреждения люминофорному покрытию экрана и сделать ЭЛТ непригодной для эксплуатации.**

Регуляторы фокусировки и астигматизма связаны с электронной пушкой и используются для настройки размеров и формы электронного пучка до того, как он достигнет отклоняющих пластин. Оба эти регулятора — вращательные. При их вращении электронный пучок постепенно размывается на экране ЭЛТ, и оба регулятора поочередно используются до тех пор, пока на экране не получится идеально круглая четкая точка. На некоторых новых моделях осциллографов ручка управления астигматизмом может быть расположена в углублении ниже передней панели.

Регуляторы управления горизонтальным и вертикальным положением луча также являются вращательными. Они позволяют расположить электронный пучок в любом месте экрана ЭЛТ. Первоначально они устанавливаются так, чтобы электронный пучок развертывался вдоль центра ЭЛТ. После этого с помощью регуляторов можно поместить электронный пучок в удобное для измерения амплитуды и времени положение в соответствии с координатной сеткой.

Блок вертикального отклонения состоит из входного разъема, переключателя постоянного/переменного напряжения и вращательного переключателя пределов вольт/см. Пробник осциллографа соединяется с входным разъемом. Переключатель постоянного/переменного напряжения позволяет посылать сигнал либо прямо на усилитель вертикального отклонения в положении «постоянное» либо на



конденсатор в положении «переменное». Конденсатор в положении «переменное» используется для удаления постоянной составляющей из измеряемого сигнала. Переключатель вольт/см используется для установки амплитуды входного сигнала. Если сигнал слишком велик, то вертикальный усилитель искажает его. Если сигнал слишком мал, то он усиливается. Этот регулятор откалиброван в соответствии с координатной сеткой на ЭЛТ. От установки этого регулятора зависит амплитуда сигнала, подаваемого на ЭЛТ.

Блок горизонтального отклонения, управляющий изменением масштаба по оси времени, состоит из вращательного переключателя пределов время/см, переключателя управления запуском и управления уровнем запуска. Переключатель пределов, время/см устанавливает частоту горизонтальной развертки, соответствующей горизонтальной градуировке. На нижнем пределе частота развертки на экране составляет несколько циклов в секунду. С помощью переключателя управления запуском выбирается источник и полярность синхронизирующего сигнала. Источником синхронизации может быть сеть, внутренний или внешний источник. Полярность может быть положительной или отрицательной. Когда в качестве источника синхронизации выбрана сеть, то именно частота тока сети 60 (50) герц оказывается синхронизирующей частотой. Когда источник синхронизации внутренний, то в качестве синхронизирующей частоты используется частота внутреннего генератора. Положение переключателя «внешний» позволяет использовать синхронизирующую частоту внешнего генератора.

Регулятор уровня устанавливает амплитуду синхронизирующего сигнала, которая необходима для запуска генератора развертки. Если регулятор уровня находится в положении «авто» осциллограф работает в свободном режиме. Поворот регулятора уровня приводит к пустому экрану, на котором нет сигнала. Регулятор уровня надо повернуть до положения, когда сигнал на экране осциллографа исчезает, и немного повернуть обратно, чтобы сигнал



появился вновь. В этом положении регулятор сигнала устойчивый. Использование управления уровнем синхронизирующего сигнала позволяет синхронизировать генератор развертки с входным сигналом и получить устойчивое изображение на экране ЭЛТ.

Перед использованием осциллографа необходимо проверить, чтобы убедиться в его исправности. Непроверенный прибор может давать неправильные показания. Большинство осциллографов имеют встроенный генератор тестирующего сигнала. Сначала органы управления должны быть установлены в следующие положения:

Яркость, Фокусировка, Астигматизм и Управление положением луча (должны быть установлены в среднее положение).

Синхронизация: внутренняя +.

Уровень: «авто».

Время/см: 1 мсек.

Вольт/см: 0,02.

Питание: вкл.

Пробник осциллографа должен быть подсоединен к разъему источника калиброванного напряжения. На экране осциллографа должны появиться прямоугольные импульсы. Изображение должно быть устойчивым и содержать несколько периодов с амплитудой равной напряжению калибратора. Теперь осциллограф готов к работе.

Для того чтобы использовать осциллограф, установите переключатель вольт/см на высший предел. Подключите на вход осциллографа исследуемый сигнал и поворачивайте переключатель вольт/см до тех пор, пока изображение не займет примерно две трети экрана по высоте. Настройте развертку так, чтобы получилось устойчивое изображение и желаемое количество периодов.

13-2. Вопросы

1. Что можно узнать о колебаниях с помощью осциллографа?
2. Каковы основные части осциллографа?



3. Опишите процедуру настройки осциллографа перед его первым использованием.
4. Как используется осциллограф при работе с электрическими цепями?
5. Для чего нужна координатная сетка на экране осциллографа?

13-3. ЧАСТОТОМЕРЫ

Частотомер (рис. 13-11) измеряет частоту сигнала путем сравнения ее с известной заданной частотой. Все частотомеры состоят из одних и тех же составных частей: генератора меток времени, формирователя входного сигнала, цепи генерации стробирующих импульсов, электронного коммутатора, десятичного счетчика и дисплея (рис. 13-12).

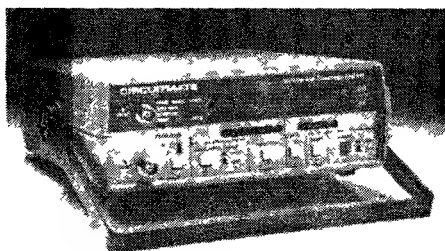


Рис. 13-11. Частотомеры широко используются в ремонтных мастерских и в промышленности.

Формирователь сигнала преобразует входной сигнал в сигнал с такой формой и амплитудой, который совместим с входными цепями счетчика. Электронный коммутатор пропускает сформированный входной сигнал на счетчик, где в то же самое время присутствует сигнал от генератора меток времени. Генератор меток времени возбуждает цепь генерации стробирующих импульсов с помощью сигнала, сравнимого с измеряемым сигналом. Цепь генерации стробирующих импульсов работает как центр синхронизации счетчика. Он управляет открытием и закрытием электронного коммутатора, а также вырабатывает сигнал установки времени индикации и сигнал сброса для начала

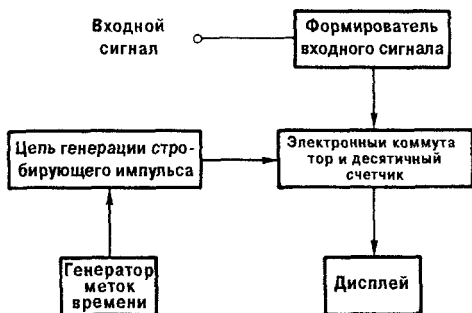


Рис. 13-12. Блок-схема электронного частотомера.

нового счета. Десятичный счетчик подсчитывает все импульсы, проходящие через электронный коммутатор. Для каждого отображаемого разряда требуется один десятичный счетчик. Дисплей, который обеспечивает визуальное отображение измеряемой частоты, может быть одного из нескольких типов. Наиболее часто используются дисплеи на газоразрядных индикаторах, светодиодные дисплеи и жидкокристаллические дисплеи.

Электронные частотомеры когда-то были исключительно лабораторным оборудованием, но в настоящее время они используются в мастерских по ремонту бытовой аппаратуры, конструкторами, радиолюбителями и в промышленности. Широкое использование частотомеров связано с применением микросхем, которые уменьшили размеры и цену частотомеров и увеличили их точность, стабильность, надежность и диапазон измеряемых частот. (Интегральные микросхемы рассматриваются в разделе 3).

13-3. Вопросы

1. Какова функция электронного частотомера?
2. Из каких основных частей состоит частотомер?
3. Нарисуйте блок-схему электронного частотомера.
4. Какова функция формирователя сигнала в частотомере?
5. Почему увеличивается популярность частотомеров?



РЕЗЮМЕ

- Для измерения переменного тока или напряжения с помощью приборов магнитоэлектрической системы ток или напряжение сначала надо преобразовать в постоянное.
- Приборы электромагнитной системы не требуют преобразования в постоянный ток.
- Работа измерительных клещей основана на том, что ток, текущий по проводу, создает магнитное поле.
- Осциллограф позволяет получить следующую информацию о сигнале в цепи:
 - частоту сигнала;
 - длительность сигнала;
 - фазовые соотношения между сигналами;
 - форму сигнала;
 - амплитуду сигнала.
- Основными частями осциллографа являются:
 - электронно-лучевая трубка;
 - генератор развертки;
 - усилитель горизонтального отклонения;
 - усилитель вертикального отклонения;
 - блок питания.
- Частотомер измеряет частоту путем сравнения колебания неизвестной частоты с колебанием известной частоты.
- Основными частями частотомера являются:
 - генератор меток времени;
 - формирователь входного сигнала;
 - цепь генерации стробирующих импульсов;
 - электронный коммутатор;
 - десятичный счетчик;
 - дисплей.

Глава 13. САМОПРОВЕРКА

- Опишите, как прибор предназначенный для измерения постоянного тока, может быть применен для измерения переменного тока?



- Объясните, как измерительные клещи используются для измерения тока.
- Какие параметры сигнала можно измерить при помощи осциллографа?
- Опишите процесс проверки осциллографа для определения правильности его работы.
- Перечислите основные блоки частотомера и опишите функции каждого из них.
- Какова главная причина того, что частотомеры появились на рабочих местах ремонтных мастерских?

Прерывание — это сигнал от внешнего устройства, которое сообщает компьютеру, что оно хочет принять или послать данные.

Микропроцессор — это часть микрокомпьютера. Он состоит из блока управления и арифметико-логического устройства.

Микропроцессор выполняет функции управления и выполняет операции, связанные с математической логикой и принятием решений.

Глава 14. РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать фазовые соотношения между током и напряжением в резистивной цепи.
- Применять закон Ома к резистивным цепям переменного тока.
- Вычислять неизвестные величины в последовательных резистивных цепях переменного тока.
- Вычислять неизвестные величины в параллельных резистивных цепях переменного тока.
- Вычислять мощность в резистивных цепях переменного тока.

Соотношения между током, напряжением и сопротивлением одинаковы в цепях переменного и постоянного токов. Прежде чем перейти к сложным цепям переменного тока, содержащим индуктивность и емкость, необходимо разобраться с простыми цепями переменного тока.

14-1. ОСНОВНЫЕ РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Основная цепь переменного тока (рис. 14-1) состоит из источника переменного тока, проводников и резистивной нагрузки. Источником переменного тока может быть генератор или цепь, генерирующая напряжение переменного тока. Резистивной нагрузкой может быть резистор, нагреватель, лампа или любое подобное устройство.

Когда к резистивной нагрузке приложено переменное напряжение, амплитуда и направление переменного тока изменяются так же, как и у приложенного напряжения. Когда приложенное напряжение изменяет полярность, ток



Рис. 14-1. Основная цепь переменного тока состоит из источника переменного тока, проводников и резистивной нагрузки.

также изменяет полярность, т.е. эти величины находятся в **фазе**. На рис. 14-2 показано совпадение по фазе, которое имеет место между током и приложенным напряжением в чисто резистивной цепи. Синусоиды тока и напряжения проходят через нуль и принимают максимальные значения в одни и те же моменты времени. Однако эти две синусоиды имеют разные амплитуды, поскольку представляют различные величины, измеряемые в различных единицах.

Синусоиды тока и напряжения проходят через нуль и принимают максимальные значения в одни и те же моменты времени. Однако эти две синусоиды имеют разные амплитуды, поскольку представляют различные величины, измеряемые в различных единицах.

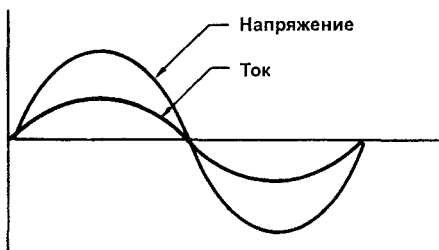


Рис. 14-2. В чисто резистивной цепи напряжение и ток находятся в фазе.

Переменный ток, текущий через резистор, изменяется при изменении напряжения или сопротивления цепи. Ток в цепи в любой момент может быть определен с помощью закона Ома.

При большинстве измерений используются эффективные или действующие значения. Как установлено ранее, эффективное значение переменного тока — это такое значение постоянного тока, при котором выделяется такое же количество тепла. Эффективное значение может рассматриваться как эквивалентное значение постоянного тока. В чисто резистивной цепи закон Ома применяется к эффективным значениям переменного тока так же, как и к значениям постоянного тока.

ПРИМЕР: Чему равно эффективное значение тока в цепи, если она содержит источник переменного тока 120 вольт



и сопротивление 1000 ом? (Помните, что значения переменного тока и напряжения считаются эффективными, если не оговорено другое).

Дано:

$$I = ?$$

$$E = 120 \text{ В}$$

$$R = 1000 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{120}{1000}$$

$$I = 0,12 \text{ А.}$$

ПРИМЕР: Чему равно эффективное значение приложенного напряжения, если через резистор 68 ом течет ток с эффективным значением 1,7 ампера?

Дано:

$$I = 1,7 \text{ А}$$

$$E = ?$$

$$R = 68 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I = \frac{E}{R}$$

$$1,7 = \frac{E}{68}$$

$$E = 115,60 \text{ В.}$$

14-1. Вопросы

1. Каково фазовое соотношение между током и напряжением в чисто резистивной цепи?
2. Какое значение переменного тока используется в большинстве измерений?
3. Чему равно эффективное значение тока в цепи с сопротивлением 10000 Ом при приложенном напряжении 12 вольт?
4. Какова величина эффективного напряжения приложенного к цепи с сопротивлением 100 Ом, по которой течет ток 250 миллиампер?
5. Каково сопротивление цепи, по которой течет ток 250 миллиампер при приложенном переменном напряжении 12 вольт?

14-2. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Ток в резистивной цепи зависит от приложенного напряжения. Ток всегда находится в фазе с напряжением,



независимо от числа резисторов в цепи. Ток имеет одно и то же значение в любой точке последовательно соединенной цепи.

На рис. 14-3 показана простая последовательная цепь. Через оба резистора течет одинаковый ток. Падение напряжения на каждом резисторе можно определить с помощью закона Ома. Сумма падений напряжения равна приложенному напряжению. На рис. 14-4 показаны фазовые соотношения падений напряжения, приложенного напряжения и тока в цепи. В чисто резистивной цепи все напряжения и ток находятся в фазе друг с другом.

ПРИМЕР: Если переменное напряжение с эффективным значением 120 вольт приложено к двум резисторам ($R_1 = 470 \text{ Ом}$ и $R_2 = 1000 \text{ Ом}$), то чему равно падение напряжения на каждом резисторе?

Дано:

$$R_1 = 470 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1000 \text{ Ом}$$

Решение:

Сначала найдем полное сопротивление (R_T)

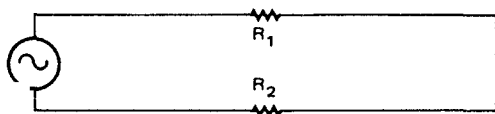


Рис. 14-3. Простая последовательная цепь переменного тока.

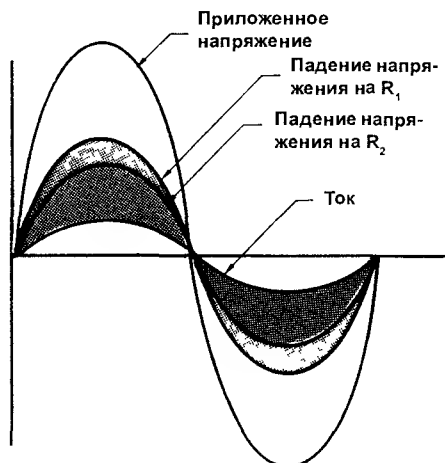


Рис. 14-4. В последовательной цепи переменного тока падения напряжений, приложенное напряжение и ток находятся в фазе.



$$E_{R_1} = ?$$

$$E_{R_2} = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В.}$$

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 470 + 1000$$

$$R_T = 1470 \text{ Ом.}$$

Зная R_T , найдем общий ток (I_T)

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{1470}$$

$$I_T = 0,082 \text{ А.}$$

В последовательной цепи $I_T = I_{R_1} = I_{R_2} = 0,082 \text{ А.}$

Используя I_1 , найдем падение напряжения на резисторе R_1 .

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$

$$0,082 = \frac{E_{R_1}}{470}$$

$$E_{R_1} = 38,54 \text{ В.}$$

Используя I_2 , найдем падение напряжения на резисторе R_2 .

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$0,082 = \frac{E_{R_2}}{1000}$$

$$E_{R_2} = 82 \text{ В.}$$

Вычисленные падения напряжения на каждом резисторе являются эффективными значениями.

14-2. Вопросы

1. Чему равно падение напряжения на двух резисторах 22 кОм и 47 кОм, соединенных последовательно и подключенных к источнику с напряжением 24 вольт?
2. Чему равно падение напряжения на следующих резисторах, соединенных последовательно:
 - а. $E_T = 100 \text{ В}$, $R_1 = 680 \text{ Ом}$, $R_2 = 1200 \text{ Ом}$;



- б. $E_T = 24 \text{ В}$, $R_1 = 22 \text{ кОм}$, $R_2 = 47 \text{ кОм}$;
- в. $I_T = 250 \text{ мА}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$;
- г. $R_T = 10 \text{ кОм}$, $I_{R_1} = 1 \text{ мА}$, $R_2 = 4,7 \text{ кОм}$;
- д. $E_T = 120 \text{ В}$, $R_1 = 720 \text{ Ом}$, $I_{R_2} = 125 \text{ мА}$.

14-3. ПАРАЛЛЕЛЬНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В параллельной цепи (рис. 14-5) напряжение на всех ветвях одинаково. Однако общий ток делится между отдельными ветвями. В параллельной цепи переменного тока общий ток находится в фазе с приложенным напряжением (рис. 14-6). Токи отдельных ветвей также находятся в фазе с приложенным напряжением.

Все значения токов и напряжений являются эффективными. Эти значения используются точно так же, как и в случае постоянного тока.

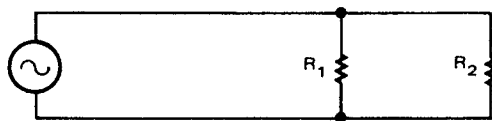


Рис. 14-5. Простая параллельная цепь переменного тока.

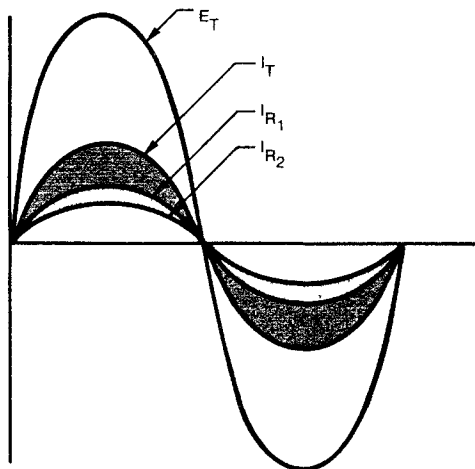


Рис. 14-6. В параллельной цепи переменного тока приложенное напряжение, общий ток и токи в отдельных ветвях находятся в фазе.



ПРИМЕР: Если в цепи переменного тока напряжение с эффективным значением 120 вольт приложено к двум соединенным параллельно резисторам 470 ом и 1000 ом, то чему равны токи, текущие через каждый резистор ?

Дано:

$$I_{R_1} = ?$$

$$I_{R_2} = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_1 = 470 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 1000 \text{ Ом.}$$

Решение:

В параллельной цепи

$$E_T = E_{R_1} = E_{R_2} = 120 \text{ В}$$

Зная E_{R_1} , найдем ток через резистор R_1 .

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1} = \frac{120}{470}$$

$$I_{R_1} = 0,26 \text{ А или } 260 \text{ мА.}$$

Зная E_{R_2} , найдем ток через резистор R_2 .

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2} = \frac{120}{1000}$$

$$I_{R_2} = 0,12 \text{ А или } 120 \text{ мА.}$$

14-3. Вопросы

1. Чему равны токи, текущие в следующих параллельных резистивных цепях переменного тока?
 - а. $E_T = 100 \text{ В}$, $R_1 = 470 \text{ Ом}$, $R_2 = 1000 \text{ Ом}$;
 - б. $E_T = 24 \text{ В}$, $R_1 = 22 \text{ кОм}$, $R_2 = 47 \text{ кОм}$;
 - в. $E_T = 150 \text{ В}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$;
 - г. $I_T = 0,0075 \text{ А}$, $E_{R_1} = 10 \text{ В}$, $R_2 = 4,7 \text{ кОм}$;
 - д. $R_T = 4700 \text{ Ом}$, $I_{R_1} = 11 \text{ мА}$, $E_{R_2} = 120 \text{ В}$.

14-4. МОЩНОСТЬ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

В цепях переменного тока мощность потребляется точно так же, как и в цепях постоянного тока. Мощность измеряется в ваттах и равна произведению тока на напряжение.

Мощность, потребляемая резистором в цепи переменного тока, зависит от тока, текущего через него, и от прило-



женного к нему напряжения. На рис. 14-7 показано соотношение между мощностью, током и напряжением. Кривая мощности не опускается ниже нуля, так как мощность выделяется в виде тепла. Мощность остается положительной независимо от того, в каком направлении течет ток.

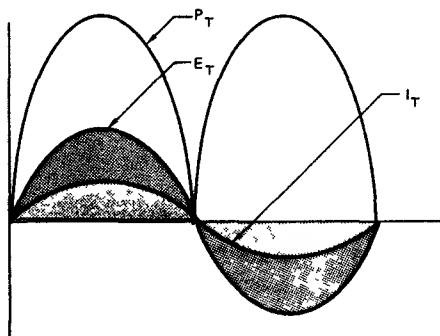


Рис. 14-7. Соотношение между мощностью, током и напряжением в резистивной цепи переменного тока.

Мощность изменяется от максимального значения до нуля. Средняя мощность, потребляемая цепью, имеет промежуточное значение между максимальным значением и нулем. В цепи переменного тока средняя мощность — это мощность, потребляемая цепью. Ее можно определить, умножая эффективное значение напряжения на эффективное значение тока:

$$P = IE.$$

ПРИМЕР: Какая мощность потребляется цепью переменного тока, в которой напряжение 120 вольт приложено к сопротивлению 150 ом? (Помните, что значение напряжения считается эффективным, если не оговорено другое).

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = 150 \text{ Ом}$$

$$P_T = ?$$

Решение:

Сначала найдем общий ток (I_T)

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{150}$$

$$I_T = 0,80 \text{ А.}$$

Теперь найдем полную мощность (P_T).



$$P_T = I_T E_T = (0,80)(120)$$

$$P_T = 96 \text{ Вт.}$$

Когда ток не дан, его необходимо найти перед использованием формулы мощности. Сопротивление в этой цепи потребляет мощность 96 ватт.

14-4. Вопросы

1. Чему равна полная потребляемая мощность в следующих цепях:

Последовательные:

а. $E_T = 100 \text{ В}$, $R_1 = 680 \text{ Ом}$, $R_2 = 1200 \text{ Ом}$;

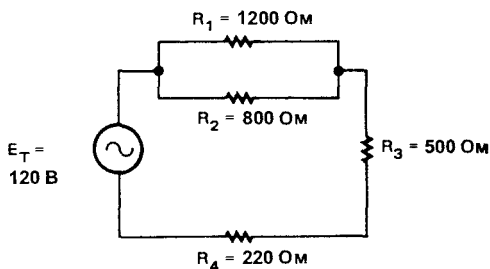
б. $I_T = 250 \text{ мА}$, $R_1 = 100 \text{ Ом}$, $R_2 = 500 \text{ Ом}$.

Параллельные:

в. $E_T = 100 \text{ В}$, $R_1 = 470 \text{ Ом}$, $R_2 = 1000 \text{ Ом}$;

г. $I_T = 7,5 \text{ мА}$, $E_{R_1} = 10 \text{ В}$, $R_2 = 4,7 \text{ кОм}$.

2. Найдите мощность, потребляемую каждым отдельным компонентом в следующей цепи:



РЕЗЮМЕ

- Основная резистивная цепь переменного тока состоит из источника тока или напряжения, проводников и резистивной нагрузки.
- Ток в резистивной цепи находится в фазе с приложенным напряжением.
- Использование эффективных значений переменного тока и напряжения приводит к таким же результатам,



как и использование эквивалентных значений постоянного тока и напряжения.

- Эффективные значения являются наиболее широко используемыми значениями, полученными при измерениях.
- Закон Ома можно использовать и для эффективных значений.
- Значения переменного тока и напряжения предполагаются эффективными, если не оговорено другое.

Глава 14. САМОПРОВЕРКА

1. Каково фазовое соотношение между током и напряжением в чисто резистивной цепи ?
2. Каково эффективное значение напряжения в цепи переменного тока, в которой течет ток 25 мА через сопротивление 4,7 кОм ?
3. Каково падение напряжения на двух резисторах 4,7 кОм и 3,9 кОм, соединенных последовательно в цепи переменного тока при приложенном напряжении 12 вольт?
4. Чему равен ток через каждый из резисторов 2,2 кОм и 5,6 кОм, соединенных параллельно при приложенном к ним переменном напряжении 120 вольт?
5. Что определяет потребление мощности в цепи переменного тока?
6. Чему равна потребляемая мощность в цепи переменного тока, в которой напряжение 120 вольт приложено к нагрузке 1200 Ом?

Глава 15. ЕМКОСТНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать фазовое соотношение между током и напряжением в емкостной цепи переменного тока.
- Дать определение емкостного сопротивления (реактивного сопротивления емкости) в емкостной цепи переменного тока.
- Описать, как резистивно-емкостные цепи могут использоваться для фильтрации, в качестве элементов согласования и фазового сдвига.
- Объяснить как работают RC фильтры верхних и нижних частот.

Конденсаторы являются ключевыми компонентами цепей переменного тока. Конденсаторы вместе с резисторами и катушками индуктивности образуют полезные электронные цепи.

15-1. КОНДЕНСАТОРЫ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Когда к конденсатору прикладывается переменное напряжение, создается впечатление, что во всей цепи есть поток электронов. Однако, электроны не проходят через диэлектрик конденсатора. При увеличении и уменьшении амплитуды переменного тока конденсатор заряжается и разряжается. Результирующее движение электронов от одной обкладки к другой представляет ток.

В емкостной цепи переменного тока фазовое соотношение между током и приложенным напряжением не такое, как в чисто резистивной цепи. В чисто резистивной цепи ток находится в фазе с приложенным напряжением. В емкостной цепи переменного тока ток и напряжение нахо-

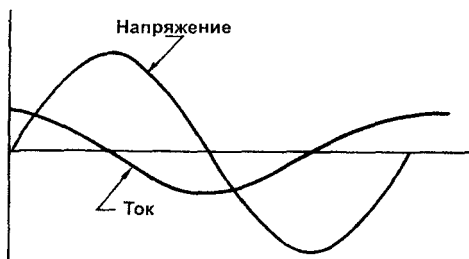


Рис. 15-1. Обратите внимание на то, что ток и напряжение в емкостной цепи переменного тока находятся не в фазе. Ток опережает приложенное напряжение.

дятся не в фазе друг с другом (рис. 15-1). Когда ток максимален, напряжение равно нулю. Это соотношение обусловлено сдвигом по фазе на 90 градусов. В емкостной цепи ток опережает приложенное напряжение.

В емкостной цепи переменного тока приложенное напряжение постоянно изменяется, вынуждая конденсатор заряжаться и разряжаться. После того как конденсатор первоначально зарядится, напряжение на его обкладках противодействует любому изменению приложенного напряжения. Противодействие, которое конденсатор оказывает приложенному переменному напряжению, называется **емкостным сопротивлением**. Емкостное сопротивление обозначается и измеряется в омах.

Емкостное сопротивление может быть вычислено по формуле:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC},$$

где $\pi = 3,14$, f — частота в герцах, C — емкость в фарадах.

Емкостное сопротивление является функцией частоты приложенного переменного напряжения и емкости. Увеличение частоты уменьшает емкостное сопротивление, что приводит к возрастанию тока. Уменьшение частоты увеличивает противодействие и приводит к уменьшению тока.

ПРИМЕР: Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью в 1 микрофараду при частоте 60 герц?

Дано:

$$X_c = ?$$

$$\pi = 3,14$$

Решение:

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC}$$



$$\begin{aligned}
 f &= 60 \text{ Гц} \\
 C &= 1 \text{ мкФ} = \\
 &= 0,000001 \text{ Ф.}
 \end{aligned}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,000001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,000377} = 2653 \text{ Ом.}$$

ПРИМЕР: Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью 1 мкФ на частоте 400 герц?

Дано:

$$\begin{aligned}
 X_C &= ? \\
 \pi &= 3,14 \\
 f &= 400 \text{ Гц} \\
 C &= 1 \text{ мкФ} = \\
 &= 0,000001 \text{ Ф.}
 \end{aligned}$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(400)(0,000001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,00251} = 398 \text{ Ом.}$$

ПРИМЕР: Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью в 0,1 микрофарады при частоте 60 герц?

Дано:

$$\begin{aligned}
 X_C &= ? \\
 \pi &= 3,14 \\
 f &= 60 \text{ Гц} \\
 C &= 0,1 \text{ мкФ} = \\
 &= 0,0000001 \text{ Ф.}
 \end{aligned}$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,0000001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,0000377} = 26,525 \text{ Ом.}$$

ПРИМЕР: Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью в 10 микрофарад при частоте 60 герц ?

Дано:

$$\begin{aligned}
 X_C &= ? \\
 \pi &= 3,14 \\
 f &= 60 \text{ Гц} \\
 C &= 10 \text{ мкФ} = \\
 &= 0,00001 \text{ Ф.}
 \end{aligned}$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,0000001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,00377} = 265 \text{ Ом.}$$

Емкостное сопротивление есть ни что иное, как противодействие изменениям приложенного к конденсатору пе-



ременного напряжения. Следовательно, в цепи переменного тока конденсатор является эффективным способом управления током. Согласно закону Ома ток прямо пропорционален приложенному напряжению и обратно пропорционален емкостному сопротивлению. Это можно выразить с помощью формулы:

$$I = \frac{E}{X_C}.$$

Замечание: В законе Ома емкостное (реактивное) сопротивление X_C заменило активное сопротивление R .

Важно помнить, что емкостное сопротивление зависит от частоты приложенного напряжения и емкости цепи.

ПРИМЕР: К конденсатору емкостью 100 мкФ приложено напряжение 12 вольт частотой 60 герц. Какова величина текущего через него тока?

Дано:

$$I = ?$$

$$E = 12 \text{ В}$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$C = 100 \text{ мкФ} = \\ = 0,0001 \text{ Ф.}$$

Решение:

Сначала найдем емкостное сопротивление (X_C)

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,0001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,0377} = 26,5 \text{ Ом.}$$

Теперь, зная X_C , найдем ток:

$$I = \frac{E}{X_C} = \frac{12}{26,5}$$

$$I = 0,45 \text{ А или } 450 \text{ мА.}$$

ПРИМЕР: Через конденсатор емкостью 10 мкФ течет ток 250 мА. Какое напряжение частотой 60 Гц приложено к конденсатору?

Дано:

$$X_C = ?$$

$$\pi = 3,14$$

Решение:

Сначала найдем емкостное сопротивление (X_C):



$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$C = 10 \text{ мкФ} =$$

$$= 0,00001 \text{ Ф}$$

$$I = 250 \text{ мА или}$$

$$0,25 \text{ А}$$

$$E = ?$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,00001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,00377} = 265 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем падение напряжения (E):

$$I = \frac{E}{X_C}$$

$$0,25 = \frac{E}{265}$$

$$E = 66,25 \text{ В.}$$

Когда конденсаторы соединены последовательно, общее емкостное сопротивление равно сумме емкостных сопротивлений отдельных конденсаторов:

$$X_{C_T} = X_{C_1} + X_{C_2} + X_{C_3} + \dots + X_{C_n}.$$

Когда конденсаторы соединены параллельно, обратная величина общего емкостного сопротивления равна сумме обратных величин емкостных сопротивлений отдельных конденсаторов.

$$\frac{1}{X_{C_T}} = \frac{1}{X_{C_1}} + \frac{1}{X_{C_2}} + \frac{1}{X_{C_3}} + \dots + \frac{1}{X_{C_n}}.$$

15-1. Вопросы

1. Опишите, как переменное напряжение создает впечатление протекания тока через конденсатор.
2. Каково фазовое соотношение между током и напряжением в емкостной цепи?
3. Что такое емкостное сопротивление?
4. Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью 10 мкФ при частоте 400 герц?



15-2. ПРИМЕНЕНИЕ ЕМКОСТНЫХ ЦЕПЕЙ

Конденсаторы могут использоваться отдельно или в комбинации с резисторами, образуя RC (*резистивно-емкостные*) цепи. Одним из применений RC цепей является фильтрация.

Фильтром называется цепь, выделяющая некоторую область частот, ослабляя токи одних частот и пропуская другие. Фильтры имеют частоту (точку) среза между частотами, которые пропускаются, и частотами, которые ослабляются. Наиболее широко используются два типа фильтров: фильтры нижних частот и фильтры верхних частот. **Фильтр нижних частот** пропускает низкие частоты и ослабляет верхние. **Фильтр верхних частот** пропускает частоты, находящиеся выше частоты среза, и ослабляет частоты ниже частоты среза.

Фильтр нижних частот (рис. 15-2) состоит из конденсатора и резистора, включенных последовательно. Входное напряжение приложено к последовательной цепочке из конденсатора и резистора. Выходное напряжение снимается с конденсатора. На низких частотах емкостное сопротивление больше, чем сопротивление резистора, так что большая часть напряжения падает на конденсаторе. Следовательно, большая часть напряжения появляется и на выходе. При повышении частоты входного напряжения емкостное сопротивление уменьшается, и на конденсаторе падает меньшее напряжение. Следовательно, на резисторе падает большее напряжение, и выходное напряжение уменьшается. Частота среза не является резкой границей. Чем

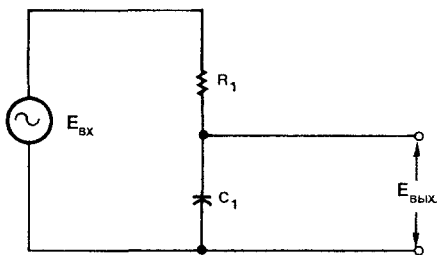


Рис. 15-2. RC фильтр нижних частот.



Рис. 15-3. Амплитудно-частотная характеристика RC фильтра нижних частот.

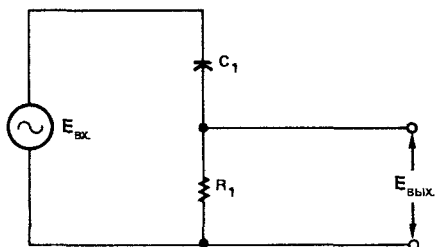
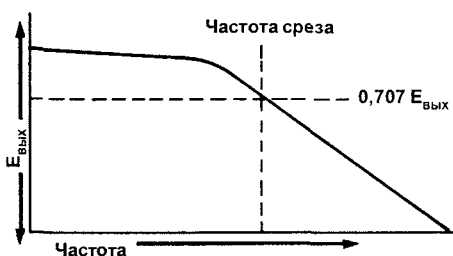


Рис. 15-4. RC фильтр верхних частот.

выше частота входного сигнала, тем больше он ослабляется. На рис. 15-3 показана амплитудно-частотная характеристика RC фильтра нижних частот.

Фильтр верхних частот также состоит из резистора и конденсатора, включенных последовательно (рис. 15-4). Однако выходное напряжение снимается с резистора. На высоких частотах емкостное сопротивление низкое и большая часть напряжения падает на резисторе. При уменьшении частоты емкостное сопротивление увеличивается и на конденсаторе падает большее напряжение. В результате уменьшается выходное напряжение на резисторе. И опять уменьшение выходного напряжения является постепенным. На рис. 15-5 показана амплитудно-частотная характеристика RC фильтра верхних частот.

Большинство электронных цепей используют как переменное, так и постоянное напряжения. Это приводит к тому, что сигнал переменного тока накладывается на сигнал постоянного тока. Если постоянный ток используется для питания оборудования, то желательно удалить из него сигналы переменного тока. Для этой цели можно ис-



Рис. 15-5. Амплитудно-частотная характеристика RC фильтра верхних частот.

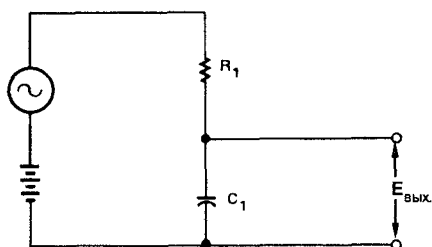
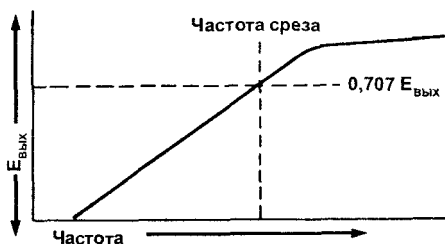


Рис. 15-6. Развязывающая RC цепочка.

пользовать фильтр нижних частот. *Развязывающая* цепь (рис. 15-6) пропускает сигнал постоянного тока и ослабляет или устраняет сигнал переменного тока. Сигнал переменного тока может иметь форму колебаний, шумов или переходных импульсов. Путем подбора частоты среза большинство сигналов переменного тока может быть отфильтровано, и останется только постоянное напряжение на конденсаторе.

В других случаях желательно пропустить сигнал переменного тока и блокировать постоянное напряжение. Цепи этого типа называются *связывающими* (рис. 15-7). Для этих цепей можно использовать RC фильтр верхних частот. Сначала конденсатор заряжается до уровня постоянного напряжения. Когда конденсатор зарядится, постоянный ток уже не сможет течь по цепи. Источник переменного напряжения заставит конденсатор заряжаться и разряжаться с частотой переменного тока, создавая ток через резистор. Номинальные значения конденсатора и резистора выбираются таким образом, чтобы сигнал переменного тока проходил без затухания.

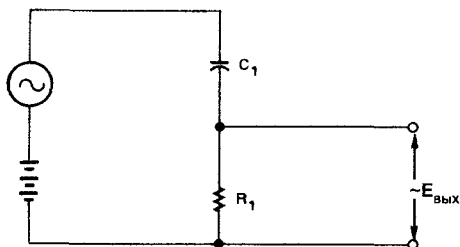


Рис. 15-7. RC цепочка связи.

Иногда бывает необходимо сдвинуть фазу выходного сигнала переменного тока по отношению к входному сигналу. Для сдвига фазы могут также использоваться RC цепи. RC цепи фазового сдвига используются только тогда, когда желателен небольшой сдвиг фаз, порядка 60 градусов.

На рис. 15-8 показана цепь фазового сдвига, в которой входное напряжение приложено к комбинации резистор-конденсатор, а выходное напряжение снимается с резистора. Ввиду наличия конденсатора в этой цепи ток опережает напряжение. Напряжение на резисторе находится в фазе с током. Это приводит к тому, что выходное напряжение опережает по фазе входное.

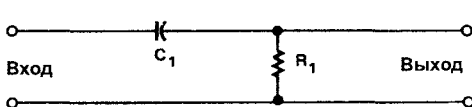


Рис. 15-8. Цепь фазового сдвига, в которой выходное напряжение опережает по фазе входное.

На рис. 15-9 выходное напряжение снимается с конденсатора. Ток в цепи опережает приложенное напряжение. Однако напряжение на конденсаторе отстает от приложенного напряжения.

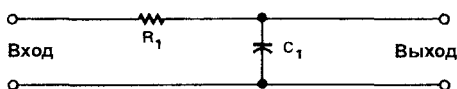


Рис. 15-9. Цепь фазового сдвига, в которой выходное напряжение на конденсаторе отстает от приложенного напряжения.

Для достижения большего сдвига фаз несколько фазосдвигающих RC цепочек можно включить последователь-

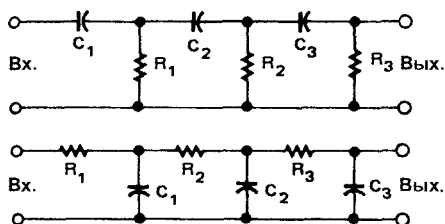


Рис. 15-10. Каскадные фазосдвигающие RC цепи.

но (каскадно) (рис. 15-10). Однако каскадное включение цепочек уменьшает выходное напряжение. Для повышения выходного напряжения до необходимого уровня нужен усилитель.

Фазосдвигающие цепочки пригодны только на одной частоте, так как емкостное сопротивление изменяется с частотой. Изменение емкостного сопротивления приводит к различным фазовым сдвигам.

15-2. Вопросы

1. Каковы три основных применения резистивно-емкостных цепочек в электронных цепях?
2. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику фильтра нижних частот и расскажите, как он работает.
3. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику фильтра верхних частот и расскажите, как он работает.
4. Для чего предназначена развязывающая цепь?
5. Где используются фазосдвигающие RC цепочки?

РЕЗЮМЕ

- Когда к конденсатору приложено переменное напряжение, появляется ток.
- Зарядка и разрядка конденсатора создает впечатление протекания тока.
- В емкостной цепи ток опережает по фазе приложенное напряжение на 90 градусов.
- Емкостное сопротивление — это противодействие заряженного конденсатора изменению приложенного напряжения.



- Емкостное сопротивление обозначается X_C .
- Емкостное сопротивление измеряется в ом.х.
- Емкостное сопротивление может быть вычислено по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

- RC цепочки используются для фильтрации, связи и сдвига фаз.
- Фильтр — это цепь, которая ограничивает пропускание некоторых частот.
- Фильтр нижних частот пропускает частоты ниже частоты среза. Он состоит из резистора и конденсатора, соединенных последовательно.
- Фильтр верхних частот пропускает частоты выше частоты среза. Он состоит из резистора и конденсатора, соединенных последовательно.
- Цепочки связи пропускают сигналы переменного тока и блокируют сигналы постоянного тока.

Глава 15. САМОПРОВЕРКА

1. Каково фазовое соотношение между током и приложенным напряжением в емкостной цепи?
2. Чему равно емкостное сопротивление конденсатора емкостью 1000 мкФ на частоте 60 герц?
3. Чему равен ток, текущий через конденсатор, указанный в предыдущем вопросе, при приложенном напряжении 12 вольт?
4. Перечислите три основных применения емкостных цепей.
5. Почему важны емкостные цепочки связи?

Глава 16. ИНДУКТИВНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать фазовое соотношение между током и напряжением в индуктивной цепи переменного тока.
- Дать определение индуктивного сопротивления в цепи переменного тока.
- Дать определение импеданса и рассказать о его влиянии на индуктивные цепи.
- Описать, как индуктивно-резистивная цепь может быть использована для фильтрации и сдвига фаз.
- Объяснить, как работают фильтры верхних и нижних частот на индуктивных цепях.

Катушки индуктивности, как и конденсаторы, препятствуют прохождению тока в цепях переменного тока. Большое количество электронных цепей состоит из катушек индуктивности и резисторов.

16-1. ИНДУКТИВНОСТЬ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Катушки индуктивности противодействуют протеканию тока в цепях переменного тока. Когда к катушке индуктивности приложено переменное напряжение, она создает магнитное поле. Изменение полярности приложенного напряжения приводит к расширению или сжатию магнитного поля. Магнитное поле в свою очередь индуцирует напряжение в витках катушки, которое называется электродвижущей силой (э.д.с.) самоиндукции. Чем больше индуктивность, тем больше э.д.с. самоиндукции. Э.д.с. самоиндукции сдвинута по фазе на 180 градусов относительно приложенного напряжения (рис. 16-1) и противодействует

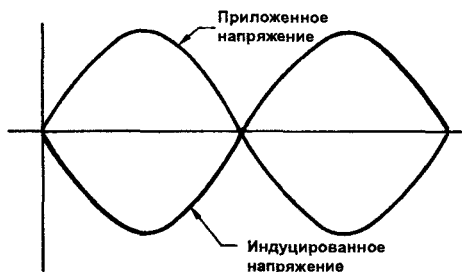


Рис. 16-1. В индуктивной цепи приложенное напряжение и индуцированное напряжение сдвинуты относительно друг друга по фазе на 180 градусов.

приложенному напряжению. Это противодействие так же эффективно уменьшает ток, как и резистор.

Величина напряжения, индуцируемого катушкой индуктивности, зависит от скорости изменения магнитного поля. Чем быстрее магнитное поле расширяется и сжимается, тем больше индуцируемое напряжение. Общее эффективное напряжение на катушке индуктивности равно разности приложенного и индуцированного напряжений. Индуцированное напряжение всегда меньше, чем приложенное напряжение.

На рис. 16-2 показано фазовое соотношение между током и приложенным напряжением. Заметим, что в чисто индуктивной цепи ток отстает от приложенного напряжения на 90 градусов.

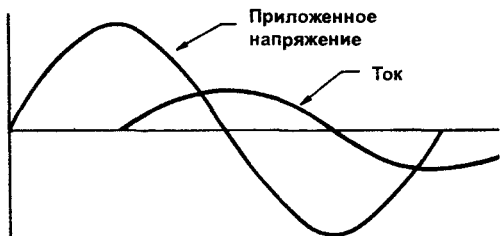


Рис. 16-2. В индуктивной цепи переменного тока ток отстает по фазе от приложенного напряжения.

Противодействие, которое оказывает катушка индуктивности току в цепи переменного тока, называется **индуктивным сопротивлением**. Индуктивное сопротивление измеряется в омах. Величина индуктивного сопротивления зависит от индуктивности и частоты приложенного напряжения. Чем больше индуктивность, тем больше создавае-



мое ею магнитное поле и тем больше противодействие току. Аналогично, чем выше частота, тем больше противодействие току.

Индуктивное сопротивление обозначается символом X_L . Индуктивное сопротивление определяется формулой:

$$X_L = 2\pi fL,$$

где $\pi = 3,14$, f — частота в герцах, L — индуктивность в генри.

ПРИМЕР: Чему равно индуктивное сопротивление катушки индуктивностью 0,15 генри на частоте 60 герц?

Дано:

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$L = 0,15 \text{ Гн.}$$

Решение:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(60)(0,15)$$

$$X_L = 56,52 \text{ Ом.}$$

ПРИМЕР: Чему равно индуктивное сопротивление катушки индуктивностью 0,15 генри на частоте 400 герц?

Дано:

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 400 \text{ Гц}$$

$$L = 0,15 \text{ Гн.}$$

Решение:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(400)(0,15)$$

$$X_L = 376,80 \text{ Ом.}$$

Заметим, что индуктивное сопротивление увеличивается при увеличении частоты.

Закон Ома применяется к индуктивному сопротивлению в цепях переменного тока точно так же, как он применяется к резисторам. Индуктивное сопротивление в цепи переменного тока прямо пропорционально приложенному напряжению и обратно пропорционально току. Это соотношение выражается следующей формулой:

$$I = \frac{E}{X_L}.$$

ПРИМЕР: Какой ток течет через катушку индуктивности 250 миллигенри, когда к ней приложено напряжение 12 вольт с частотой 60 герц?

*Дано:*

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$L = 0,25 \text{ Гн}$$

$$I = ?$$

$$E = 12 \text{ В.}$$

Решение:

Сначала найдем индуктивное сопротивление (X_L)

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(60)(0,25)$$

$$X_L = 94,20 \text{ Ом}$$

Используя X_L , найдем ток (I).

$$I = \frac{E}{X_L} = \frac{12}{94,2}$$

$$I = 0,127 \text{ А или } 127 \text{ мА.}$$

ПРИМЕР: Какое напряжение нужно приложить для того, чтобы через дроссель индуктивностью 15 миллигенри шел ток 10 миллиампер при частоте 400 герц?

Дано:

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 400 \text{ Гц}$$

$$L = 0,015 \text{ Гн}$$

$$I = 0,01 \text{ А}$$

$$E = ?$$

Решение:

Сначала найдем индуктивное сопротивление (X_L)

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(400)(0,015)$$

$$X_L = 37,68 \text{ Ом.}$$

Используя X_L , найдем напряжение (E).

$$I = \frac{E}{X_L}$$

$$0,01 = \frac{E}{37,68}$$

$$E = 0,38 \text{ В.}$$

ПРИМЕР: Чему равно индуктивное сопротивление катушки, по которой течет ток 120 миллиампер при приложенном напряжении 120 вольт?

Дано:

$$I = 0,12 \text{ А}$$

$$E = 120 \text{ В}$$

$$X_L = ?$$

Решение:

$$I = \frac{E}{X_L}$$

$$0,12 = \frac{120}{X_L}$$

$$X_L = 1000 \text{ Ом.}$$



Импедансом цепи, содержащей индуктивность и сопротивление, называется общее противодействие току, оказываемое и индуктивностью, и резистором. Вследствие наличия сдвига фаз, обусловленного наличием индуктивности, индуктивное сопротивление и сопротивление резистора нельзя просто сложить. Импеданс является векторной суммой индуктивного сопротивления и сопротивления резистора в цепи. Импеданс измеряется в омах и обозначается буквой Z . Импеданс можно определить с помощью закона Ома следующим образом:

$$I = \frac{E}{Z}.$$

Наиболее распространенная индуктивная цепь состоит из резистора и катушки индуктивности, соединенных последовательно. Такая цепь называется RL цепью. Импеданс последовательной RL цепи равен корню квадратному из суммы квадратов индуктивного сопротивления и сопротивления резистора:

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}.$$

ПРИМЕР: Чему равен импеданс цепи, состоящей из дросселя индуктивностью 100 миллигенри и соединенного последовательно резистора 470 ом, при приложенном к ним напряжении 12 вольт с частотой 60 герц ?

Дано:

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$L = 100 \text{ мГн} = \\ = 0,1 \text{ Гн}$$

$$Z = ?$$

$$R = 470 \text{ Ом.}$$

Решение:

Сначала найдем индуктивное сопротивление (X_L):

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(60)(0,1)$$

$$X_L = 37,68 \text{ Ома.}$$

Используя X_L , найдем импеданс (Z):

$$Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$$

$$Z = \sqrt{(470)^2 + (37,68)^2}$$

$$Z = 471,51 \text{ Ом.}$$



Когда катушки индуктивности соединены последовательно, их общее индуктивное сопротивление равно сумме индуктивных сопротивлений отдельных катушек:

$$X_{L_T} = X_{L_1} + X_{L_2} + X_{L_3} + \dots + X_{L_n}.$$

Когда катушки индуктивности соединены параллельно, обратная величина их общего индуктивного сопротивления равна сумме обратных величин индуктивных сопротивлений отдельных катушек:

$$\frac{1}{X_{L_T}} = \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{X_{L_2}} + \frac{1}{X_{L_3}} + \dots + \frac{1}{X_{L_n}}.$$

16-1. Вопросы

1. Как катушки индуктивности реагируют на приложенное переменное напряжение?
2. Каково фазовое соотношение между током и напряжением в индуктивной цепи?
3. Что такое индуктивное сопротивление?
4. Чему равно индуктивное сопротивление катушки индуктивностью 200 миллигенри на частоте 10000 герц?
5. Как определяется импеданс для индуктивно-резистивной цепи?

16-2. ПРИМЕНЕНИЯ ИНДУКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ

Индуктивные цепи широко используются в электронике. Катушки индуктивности дополняют конденсаторы в цепях фильтрации и фазового сдвига. Поскольку катушки индуктивности больше, тяжелее и дороже, чем конденсаторы, они применяются реже. Однако преимущество катушек индуктивности в том, что они обеспечивают реактивное сопротивление и пропускают постоянный ток. Конденсаторы могут обеспечивать реактивное сопротивление, но при этом они блокируют прохождение постоянного тока.

Катушки индуктивности иногда комбинируют с конденсаторами для улучшения характеристик цепи. В этом слу-



чае реактивный эффект конденсатора противоположен реактивному эффекту катушки индуктивности. Конечный результат состоит в том, что они взаимно дополняют друг друга в цепи.

Последовательные RL цепочки используются в качестве фильтров нижних и верхних частот. На рис. 16-3 показаны два основных типа фильтров. По существу эти цепи являются резистивно-индуктивными делителями напряжения. На рис. 16-3(А) изображен фильтр нижних частот. Входное напряжение приложено к катушке индуктивности и резистору. Выходное напряжение снимается с резистора. На низких частотах реактивное сопротивление катушки низкое. Следовательно, она слабо противодействует току, и основная часть напряжения падает на резисторе. При увеличении частоты входного напряжения индуктивное сопротивление увеличивается и оказывает большее противодействие току, так что большая часть приложенного напряжения падает на индуктивности. Чем больше падение напряжения на катушке индуктивности, тем меньше падение напряжения на резисторе, т.к. сумма падений напряжения в цепи равна приложенному напряжению. Увеличение частоты входного напряжения уменьшает выходное напряжение. Низкие частоты фильтр пропускает с небольшим уменьшением амплитуды, тогда как амплитуда напряжений высоких частот уменьшается значительно.

На рис. 16-3(Б) изображен фильтр верхних частот. Входное напряжение приложено к катушке индуктивности и резистору, а выходное напряжение снимается с катушки индуктивности. На высоких частотах индуктивное сопротивление катушки высокое, и большая часть приложенного напряжения падает на катушке. При уменьшении частоты индуктивное сопротивление уменьшается, оказывая меньшее противодействие току. Это приводит к уменьшению падения напряжения на катушке, и к увеличению падения напряжения на резисторе.

Частота, выше или ниже которой фильтр пропускает или ослабляет сигналы, называется *частотой среза*. Частота

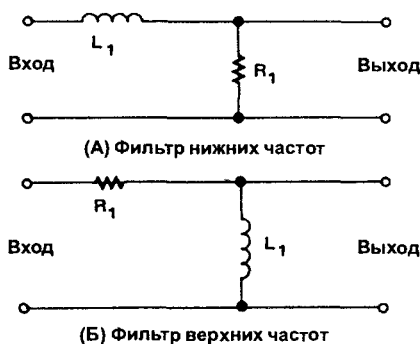


Рис. 16-3. RL фильтры.

среза обозначается символом f_c . Частоту среза можно определить по формуле:

$$f_c = \frac{R}{2\pi fL},$$

где f_c — частота среза в герцах, R — сопротивление в омах, $\pi = 3,14$, f — частота в герцах, L — индуктивность в генри.

16-2. Вопросы

1. В чем неудобство использования катушек индуктивности в цепях?
2. В чем преимущество использования катушек индуктивности в цепях?
3. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику RL фильтра нижних частот и объясните, как он работает.
4. Нарисуйте амплитудно-частотную характеристику RL фильтра верхних частот и объясните, как он работает.
5. Как можно определить частоту среза RL цепи?

РЕЗЮМЕ

- В чисто индуктивной цепи ток отстает от приложенного напряжения на 90 градусов.
- Индуктивное сопротивление — это противодействие току, оказываемое катушкой индуктивности в цепи переменного тока.



- Индуктивное сопротивление обозначается символом X_L .
- Индуктивное сопротивление измеряется в омах.
- Индуктивное сопротивление можно вычислить по формуле:

$$X_L = 2\pi fL.$$

- Импеданс — это векторная сумма индуктивного сопротивления и сопротивления резистора в цепи.
- Последовательные RL цепи используются в качестве фильтров верхних и нижних частот.

Глава 16. САМОПРОВЕРКА

1. Каково фазовое соотношение между током и приложенным напряжением в индуктивной цепи?
2. Какой фактор влияет на индуктивное сопротивление цепи?
3. Чему равно индуктивное сопротивление катушки индуктивностью 100 миллигенри на частоте 60 герц?
4. Какой ток будет течь через катушку, описанную в вопросе 3, если к ней приложить напряжение 24 вольта?
5. Как используются в цепях катушки индуктивности?
6. Что такое частота среза индуктивной цепи?

Глава 17. РЕЗОНАНСНЫЕ ЦЕПИ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Написать формулы для определения емкостного и индуктивного сопротивления.
- Описать, как реагируют на переменный ток и напряжение конденсаторы и катушки индуктивности.
- Дать определение реактивного сопротивления последовательной цепи и уметь определить характер цепи (индуктивный или емкостный).
- Дать определение термина *импеданс*.
- Уметь вычислять импеданс, который содержит как резистивную, так и емкостную или индуктивную составляющие.
- Объяснить, как должен быть модифицирован закон Ома перед использованием его для цепей переменного тока.
- Уметь вычислять X_C , X_L , X , Z и I_T в последовательных RLC цепях.
- Уметь вычислять I_C , I_L , I_X , I_R и I_Z в параллельных RLC цепях.

В предыдущих главах сопротивление, емкость и индуктивность в цепях переменного тока рассматривались по отдельности. В этой главе исследуется комбинация сопротивления, емкости и индуктивности в цепи переменного тока. Рассматриваемые вопросы не являются новым материалом, но применяют все изложенные ранее принципы.

Когда реактивное сопротивление катушки индуктивности равно реактивному сопротивлению конденсатора в цепи, возникает резонанс. Резонансные цепи широко используются в электронике.



17-1. РЕАКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ

Емкостное реактивное сопротивление — это противодействие, которое конденсатор оказывает переменному току. Оно измеряется в омах и обозначается символом X_C . Емкостное реактивное сопротивление вычисляется по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Заметим, что при использовании этой формулы емкость должна быть выражена в фарадах (а не в долях фарады).

Индуктивное реактивное сопротивление — это противодействие, которое катушка индуктивности оказывает переменному току. Оно измеряется в омах и обозначается символом X_L . Индуктивное реактивное сопротивление вычисляется по формуле:

$$X_L = 2\pi fL.$$

Заметим, что при использовании этой формулы индуктивность должна быть выражена в генри (а не в долях генри).

Емкостное реактивное сопротивление служит причиной того, что ток опережает по фазе напряжение. Индуктивное реактивное сопротивление служит причиной того, что ток отстает по фазе от напряжения. Емкостное и индуктивное реактивные сопротивления прямо противоположны по создаваемым эффектам и, следовательно, когда в цепи присутствуют и индуктивность и емкость, общий эффект определяется разностью их значений. Эта разность называется **реактивным сопротивлением** и обозначается символом X . Реактивное сопротивление может быть выражено следующими формулами:

$$X = X_C - X_L \text{ или } X = X_L - X_C.$$

ПРИМЕР: Чему равно реактивное сопротивление цепи, содержащей конденсатор емкостью 1 мкФ, соединенный последовательно с индуктивностью 10 генри (рис. 17-1), работающей на частоте 60 герц?



Дано:

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$L = 10 \text{ Гн}$$

$$C = 1 \text{ мкФ}$$

$$X = ?$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = \frac{1}{(6,28)(60)(0,000001)}$$

$$X_C = 2654 \text{ Ом}$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_L = (6,28)(60)(10)$$

$$X_L = 3768 \text{ Ом}$$

$$X = X_L - X_C = 3768 - 2654$$

$$X = 1114 \text{ Ом (индуктивное).}$$

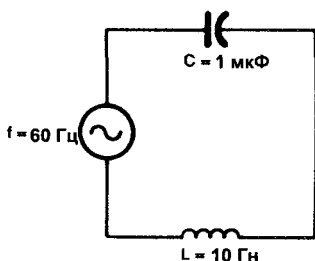


Рис. 17-1.

ПРИМЕР: Чему равно реактивное сопротивление цепи, содержащей конденсатор емкостью 1 мкФ, соединенный последовательно с индуктивностью 1 генри (рис. 17-2), работающей на частоте 60 герц?

Дано:

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$L = 1 \text{ Гн}$$

$$C = 1 \text{ мкФ}$$

$$X = ?$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = \frac{1}{(6,28)(60)(0,000001)}$$

$$X_C = 2654 \text{ Ом}$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_L = (6,28)(60)(1)$$

$$X_L = 376,8 \text{ Ом}$$

$$X = X_C - X_L = 2654 - 376,8$$

$$X = 2277,2 \text{ Ом (емкостное).}$$

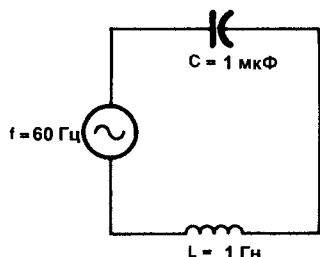


Рис. 17-2.

Эти примеры иллюстрируют важный момент. Когда емкостное и индуктивное реактивные сопротивления соединены последовательно, меньшее значение всегда вычитается из большего. Получающееся в результате реактивное сопротивление характеризуется большим значением.

17-1. Вопросы

1. Каково фазовое соотношение между током и напряжением на конденсаторе?
2. Каково фазовое соотношение между током и напряжением на катушке индуктивности?
3. По какой формуле определяется полное реактивное сопротивление последовательной цепи, когда известны значения X_C и X_L ?
4. Какова величина полного реактивного сопротивления (X) последовательной цепи, содержащей $X_C = 50 \text{ ом}$ и $X_L = 20 \text{ ом}$? Укажите, является X емкостным или индуктивным.

17-2. ИМПЕДАНС

Реактивное сопротивление, как емкостное, так и индуктивное, противодействует протеканию тока в цепях переменного тока. Активное сопротивление также препятствует протеканию тока в цепи. Комбинированное противодействие реактивного и активного сопротивлений называется **импедансом** и обозначается символом Z .

И активное, и реактивное сопротивления измеряются в омах. Следовательно, кажется логичным сложить эти



сопротивления для того, чтобы получить импеданс. Однако этого делать нельзя, поскольку активное и реактивное сопротивления — величины векторные. В цепях переменного тока, содержащих только активное сопротивление, ток и напряжение находятся в фазе. И ток, и напряжение достигают своих максимальных значений одновременно. Как упоминалось ранее, в цепях переменного тока, содержащих только реактивные сопротивления, ток будет либо опережать, либо отставать от напряжения на 90 градусов. Следовательно, напряжение в чисто реактивной цепи будет отличаться по фазе на 90 градусов от напряжения в чисто резистивной цепи.

Когда цепь содержит и активное, и реактивное сопротивление, импеданс будет больше любого из них. Кроме того, ток в такой цепи будет не в фазе с напряжением. Сдвиг по фазе будет в пределах от нуля до 90 градусов.

Для того чтобы найти импеданс, используется векторная диаграмма — прямоугольный треугольник сопротивлений. Это может быть сделано потому, что ток через резистор находится в фазе с напряжением на нем, а ток через реактивную нагрузку сдвинут по фазе на 90 градусов относительно напряжения на ней. Они находятся под прямым углом друг к другу.

ПРИМЕР: Чему равен импеданс последовательно соединенных резистора сопротивлением 150 ом и индуктивного реактивного сопротивления 100 ом?

В качестве первого шага нарисуем основание треугольника, представляющее резистор 150 ом. Далее нарисуем линию под углом 90 градусов к основанию, представляющую

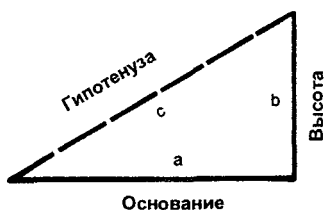


Рис. 17-3. Векторная диаграмма.



индуктивное сопротивление 100 ом. После этого соединим концы линий, образуя гипотенузу треугольника. Гипотенуза представляет импеданс цепи (рис. 17-3).

Теорема Пифагора утверждает:

$$c^2 = a^2 + b^2,$$

где c — гипотенуза, a и b — катеты.

Графически это представлено на рис. 17-4. Если импеданс, активное и реактивное сопротивления заменить соответствующими символами, то формула будет выглядеть следующим образом:

$$Z^2 = R^2 + X^2.$$



Рис. 17-4. Векторная диаграмма, показывающая связь активного сопротивления, реактивного индуктивного сопротивления и импеданса в последовательной цепи.

Вернемся к определению импеданса последовательной комбинации резистора 150 ом и индуктивного сопротивления 100 ом.

Дано:

$$R = 150 \text{ Ом}$$

$$X_L = 100 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2$$

$$Z^2 = (150)^2 + (100)^2 = 32500$$

$$Z = \sqrt{32500} = 180,28 \text{ Ом.}$$

Если вместо индуктивного в цепи находится емкостное сопротивление, то линию, представляющую емкостное сопротивление, обычно рисуют направленной вниз. Это показывает, что оно действует в направлении противоположном индуктивному сопротивлению, которое рисуют направленным вверх.

В последовательной цепи с емкостным реактивным сопротивлением формула для вычисления импеданса будет выглядеть следующим образом:

$$Z^2 = R^2 + X_C^2.$$



ПРИМЕР: Чему равен импеданс цепи, содержащей резистор сопротивлением 220 ом, соединенный последовательно с конденсатором, имеющим емкостное реактивное сопротивление 270 ом?

Дано:

$$R = 220 \text{ Ом}$$

$$X_C = 270 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$Z^2 = R^2 + X_C^2$$

$$Z^2 = (220)^2 + (270)^2 = 121300$$

$$Z = \sqrt{121300} = 348,28 \text{ Ом.}$$

$$Z = 348,28 \text{ Ом.}$$

Если последовательная цепь содержит индуктивное и емкостное реактивные сопротивления, а также активное сопротивление, необходимо найти полное реактивное сопротивление (X). Реактивное сопротивление может быть либо индуктивным, либо емкостным. Следовательно, может быть использована одна из следующих формул:

$$Z^2 = R^2 + X_L^2;$$

$$Z^2 = R^2 + X_C^2.$$

17-2. Вопросы

1. Как называется полное противодействие в цепи переменного тока?
2. Какая формула используется для вычисления величины полного противодействия в последовательной цепи?
3. Чему равно значение Z в последовательной цепи переменного тока, где $X_C = 3 \text{ Ом}$, $X_L = 6 \text{ Ом}$, а $R = 4 \text{ Ом}$?

17-3 ЗАКОН ОМА

Закон Ома не может быть применен в цепях переменного тока потому, что он не учитывает реактивное сопротивление. Модифицируя закон Ома путем учета импеданса, можно получить общий закон, который применим к цепям переменного тока.

$$I = \frac{E}{R} \text{ преобразуется в } I = \frac{E}{Z}.$$



Эта формула применима к переменному току, текущему в любой цепи.

ПРИМЕР: Последовательная цепь содержит резистор сопротивлением 510 ом, индуктивное сопротивление 250 ом и емкостное сопротивление 150 ом. Какой ток течет по цепи, если к ней приложено напряжение 120 вольт?

Дано:

$$R = 510 \text{ Ом}$$

$$X_L = 250 \text{ Ом}$$

$$X_C = 150 \text{ Ом}$$

$$E = 120 \text{ В}$$

Решение:

$$X = X_L + X_C$$

$$X = 250 - 150$$

$$X = 100 \text{ Ом (индуктивное)}$$

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$Z^2 = (510)^2 + (100)^2$$

$$Z = \sqrt{270100}$$

$$Z = 519,71 \text{ Ом}$$

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{120}{519,71}$$

$$I = 0,23 \text{ А или } 230 \text{ мА.}$$

17-3. Вопросы

1. Каким образом модифицируется закон Ома, чтобы его можно было применить к цепям переменного тока для определения напряжения и тока?
2. Последовательная цепь содержит резистор сопротивлением 510 ом, индуктивное сопротивление 300 ом и емкостное сопротивление 375 ом. Какой ток течет по цепи, если к ней приложено напряжение 120 вольт?

17-4. ЦЕПИ RLC

Материал, изложенный до сих пор, применим ко всем цепям переменного тока. В приведенных примерах рассматривались последовательные цепи. Понятия, рассмотренные в этом параграфе, не содержат нового материала, но используют все принципы, изложенные ранее.



ПРИМЕР: На рис. 17-5 показана последовательная RLC цепь. Необходимо вычислить X_C , X_L , X , Z и I_T .

Сначала вычислим X_C , X_L и X .

Дано:

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$C = 470 \text{ мкФ}$$

$$L = 27 \text{ мГн.}$$

Решение:

$$X_C = \frac{1}{2\pi f C}$$

$$X_C = \frac{1}{(6,28)(60)(0,000470)}$$

$$X_C = 5,65 \text{ Ом}$$

$$X_L = 2\pi f L$$

$$X_L = (6,28)(60)(0,027)$$

$$X_L = 10,17 \text{ Ом}$$

$$X = X_C - X_L = 10,17 - 5,65$$

$$X = 4,52 \text{ Ом (индуктивное).}$$

Используем значение X для вычисления Z .

Дано:

$$X = 4,52 \text{ Ом}$$

$$R = 10 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$Z^2 = R^2 + X^2$$

$$Z^2 = (10)^2 + (4,52)^2 = 120,43$$

$$Z = \sqrt{120,43} = 10,97 \text{ Ом.}$$

Это значение Z может быть использовано для вычисления полного тока (I_T).

Дано:

$$Z = 10,97 \text{ Ом}$$

$$E = 120 \text{ В.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E}{Z} = \frac{120}{10,97}$$

$$I_T = 10,94 \text{ А.}$$

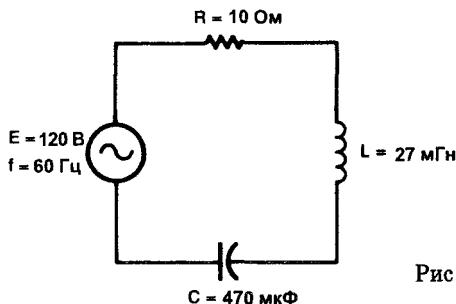


Рис. 17-5. Последовательная цепь RLC.



Помните, что во всех частях последовательной цепи течет один и тот же ток.

Если элементы в цепях соединены параллельно, то следует учесть одно главное различие между последовательными и параллельными цепями. При последовательном соединении по всей цепи течет один и тот же ток, а в параллельной цепи к каждой ветви приложено одинаковое напряжение. Вследствие этой разницы полный импеданс параллельной цепи должен вычисляться на основе тока в цепи.

В последовательной цепи RLC для вычисления реактивного сопротивления и импеданса используются следующие формулы:

$$X = X_C - X_L \text{ или } X = X_L - X_C, \quad Z^2 = R^2 + X^2.$$

В случае параллельных цепей должны использоваться следующие формулы:

$$I_X = I_C - I_L \text{ или } I_X = I_L - I_C, \quad I_Z^2 = (I_R)^2 + (I_X)^2.$$

Импеданс параллельной цепи находится с помощью формулы:

$$I_Z = \frac{E}{Z}.$$

Замечание: Если неизвестно напряжение (E), приложенное к цепи, то для вычисления I_C , I_L , I_X , I_R и I_Z можно использовать любое значение E . То же значение напряжения должно использоваться для вычисления импеданса.

ПРИМЕР: Найти значение Z для цепи, показанной на рис. 17-6.

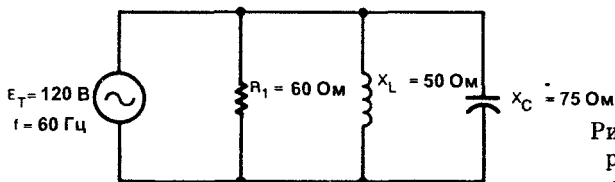


Рис. 17-6. Параллельная цепь RLC.



Дано:

$$E = 120 \text{ В}$$

$$R = 60 \text{ Ом}$$

$$X_C = 75 \text{ Ом}$$

$$X_L = 50 \text{ Ом.}$$

Решение:

Первым шагом в вычислении Z является вычисление токов отдельных ветвей.

$$I_R = \frac{E}{R} = \frac{120}{60} = 2 \text{ А}$$

$$I_C = \frac{E}{X_C} = \frac{120}{75} = 1,6 \text{ А}$$

$$I_L = \frac{E}{X_L} = \frac{120}{50} = 2,4 \text{ А}$$

Используя значения I_R , I_C , I_L , вычислим I_X и I_Z .

$$I_X = I_L - I_C = 2,4 - 1,6$$

$$I_X = 0,8 \text{ А (индуктивный)}$$

$$I_Z^2 = (I_R)^2 + (I_X)^2$$

$$I_Z^2 = (2)^2 + (0,8)^2 = 4,64$$

$$I_Z = \sqrt{4,64} = 2,15 \text{ А.}$$

Используя значение I_Z , вычислим Z .

$$I_Z = \frac{E}{Z}$$

$$2,15 = \frac{120}{Z}$$

$$Z = \frac{120}{2,15} = 55,8 \text{ Ом.}$$

В завершение этой главы отметим, что мы рассмотрели все блоки, из которых строятся электрические цепи. При изложении материала использовались ранее изученные понятия и соотношения.

17-4. Вопрос

1. Чем отличаются вычисления импеданса для последовательной цепи переменного тока и для параллельной цепи?



РЕЗЮМЕ

- Конденсатор в цепи переменного тока оказывает противодействие любому изменению напряжения, так же как он это делает в цепи постоянного тока.
- Ток опережает по фазе напряжение на конденсаторе на 90 градусов.
- Противодействие, оказываемое конденсатором переменному току, называется емкостным реактивным сопротивлением. Оно обозначается X_C и вычисляется по формуле:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

- Катушка индуктивности в цепи переменного тока противодействует любому изменению тока, так же как она это делает в цепи постоянного тока.
- На катушке индуктивности ток отстает по фазе от напряжения на 90 градусов.
- Противодействие, оказываемое катушкой индуктивности переменному току, называется индуктивным реактивным сопротивлением. Оно обозначается X_L и вычисляется по формуле

$$X_L = 2\pi fL.$$

- Полное реактивное сопротивление последовательной цепи переменного тока определяется формулами

$$X = X_C - X_L \text{ или } X = X_L - X_C.$$

- Полное реактивное сопротивление последовательной цепи переменного тока является либо емкостным, либо индуктивным, в зависимости от того, какая величина больше, X_C или X_L .
- В параллельной цепи реактивное сопротивление определяется с помощью формул

$$I_Z = \frac{E}{Z},$$

где I_Z определяется формулой $I_Z^2 = (I_R)^2 + (I_X)^2$,



а I_X вычисляется по формуле $I_X = I_C - I_L$ или $I_X = I_L - I_C$.

- Реактивное сопротивление параллельной цепи также может быть емкостным или индуктивным, в зависимости от того, какая величина больше I_C или I_L .
- Полное сопротивление цепи переменного тока называется импедансом. Он обозначается символом Z . В последовательной цепи $Z^2 = R^2 + X^2$. В параллельной цепи $I_Z^2 = (I_R)^2 + (I_X)^2$ и

$$I_Z = \frac{E}{Z}.$$

- Получена формула для закона Ома, который можно применять для цепей переменного тока:

$$I = \frac{E}{Z}.$$

Глава 17. САМОПРОВЕРКА

1. Чему равны значения X_C , X_L , X , Z и I_T для цепи, изображенной на рис. 17-7?

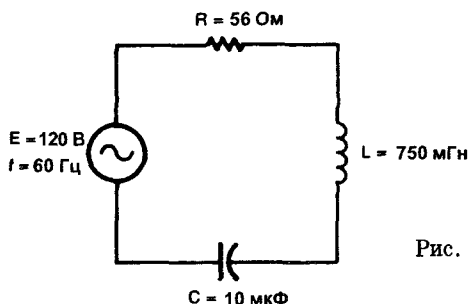


Рис. 17-7. Последовательная цепь RLC.

2. Чему равны значения I_C , I_L , I_X , I_R и I_Z для цепи, изображенной на рис. 17-8?

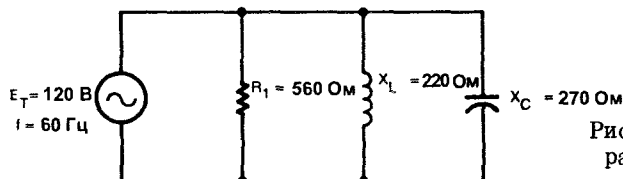


Рис. 17-8. Параллельная цепь RLC.



Глава 18. ТРАНСФОРМАТОРЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать, как работает трансформатор.
- Объяснить, в каких единицах измеряется мощность трансформатора.
- Объяснить, как трансформатор работает в цепи.
- Описать разницу между повышающим, понижающим и развязывающим трансформаторами.
- Описать, как связаны отношения напряжений, токов и числа витков в обмотках трансформатора.
- Описать применения трансформаторов.
- Перечислить различные типы трансформаторов.

Трансформаторы позволяют передавать сигнал переменного тока из одной цепи в другую. При передаче сигнала, его напряжение может повышаться, понижаться или оставаться неизменным.

18-1. ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Если две электрически изолированные катушки разместить рядом друг с другом и приложить к одной из них переменное напряжение, то возникнет изменяющееся магнитное поле. Это изменяющееся магнитное поле индуцирует напряжение во второй катушке: такое явление называется **электромагнитной индукцией**. А описанное устройство называется *трансформатором*.

Обмотка трансформатора, к которой приложено переменное напряжение, называется *первичной обмоткой*. Другая обмотка, в которой напряжение индуцируется, называется *вторичной обмоткой*. Величина индуцируемого напряжения зависит от величины взаимной индукции двух катушек. Величина взаимной индукции определяется коэффициентом



связи. Коэффициент связи — это число от 0 до 1, где 1 соответствует такому случаю, когда все линии магнитного потока первичной обмотки пересекают вторичную обмотку, а 0 — соответствует случаю, когда ни одна линия магнитного потока первичной обмотки не пересекает вторичную обмотку.

При расчете трансформатора учитывается частота, на которой он должен работать, а также мощность и напряжение, на которые он должен быть рассчитан. Например, область применения трансформатора определяет выбор материала сердечника, на который наматываются обмотки. Для применения на низких частотах используются железные сердечники, а для применения на высоких частотах — воздушные сердечники. Воздушные сердечники — это неметаллические сердечники, используемые для уменьшения потерь на высоких частотах.

Мощность трансформаторов измеряется в **вольт-амперах (ВА)**, а не в ваттах (Вт). Это обусловлено тем, что нагрузка является реактивной и, следовательно, мощность также будет реактивной. Если нагрузка является чисто емкостной, то малое реактивное сопротивление может быть причиной большого тока. Мощность в ваттах при этом будет небольшой, тогда как мощность в вольт-амперах будет отражать реальный ток, текущий в обмотках.

На рис. 18-1 показано схематическое обозначение трансформатора. Направление первичной и вторичной обмоток на сердечнике определяет полярность индуцированного напряжения во вторичной обмотке. Приложенное переменное напряжение может быть либо в фазе с индуцирован-

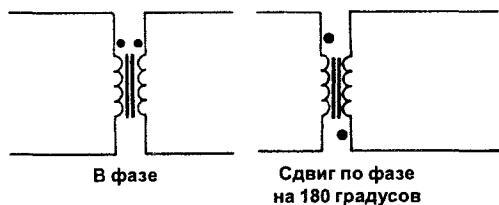


Рис. 18-1. Схематическое обозначение трансформатора, показывающее сдвиг фаз.



ным напряжением, либо сдвинуто относительно него на 180 градусов. Точки на схематическом обозначении трансформатора используются для указания полярности.

Трансформаторы иногда наматывают с отводом на вторичной обмотке (рис. 18-2). Вторичная обмотка с отводом посередине эквивалентна двум вторичным обмоткам, каждая из которых имеет по половине от общего числа витков. Центральный вывод используется в блоках питания для преобразования переменного напряжения в постоянное. Трансформатор может также иметь отводы на первичной обмотке для компенсации сетевого напряжения, которое может быть слишком низким или слишком высоким.

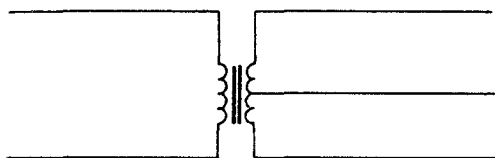


Рис. 18-2. Трансформатор с отводом от центра вторичной обмотки.

18-1. Вопросы

1. Как работает трансформатор?
2. Что учитывается при расчете трансформатора?
3. Приведите пример того, как применение трансформатора определяет его конструкцию.
4. В каких единицах измеряется мощность трансформатора?
5. Нарисуйте схематическое обозначение трансформатора.

18-2. ВЗАИМОИНДУКЦИЯ

Когда трансформатор работает без нагрузки (рис. 18-3), по вторичной обмотке не течет ток. Ток течет только по первичной обмотке, так как трансформатор подсоединен к источнику тока. Величина тока в первичной обмотке зависит от числа витков в ней. Первичная обмотка действует подобно катушке индуктивности. Небольшой ток, который течет по ней, называется током намагничивания (или

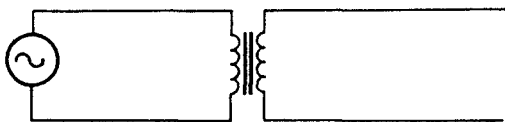


Рис. 18-3. Трансформатор без нагрузки во вторичной обмотке.

током холостого хода). Ток намагничивания компенсирует активное сопротивление первичной обмотки переменному току и поддерживает магнитное поле сердечника. Так как первичная обмотка имеет индуктивное реактивное сопротивление, ток намагничивания отстает по фазе от приложенного напряжения. Эти условия меняются при подключении нагрузки ко вторичной обмотке.

Когда ко вторичной обмотке подсоединяется нагрузка (рис. 18-4), в ней индуцируется ток. Обычно на трансформаторах вторичная обмотка намотана поверх первичной. Магнитное поле, созданное первичной обмоткой, пересекает витки вторичной обмотки. Ток во вторичной обмотке создает свое магнитное поле. Магнитное поле вторичной обмотки пересекает витки первичной обмотки, индуцируя в ней напряжение, направленное противоположно приложенному. Это магнитное поле помогает увеличению тока в первичной обмотке с помощью эффекта, называемого **взаимоиндукцией**. Первичная обмотка индуцирует напряжение во вторичной обмотке, а вторичная обмотка индуцирует направленное противоположно напряжение в первичной.

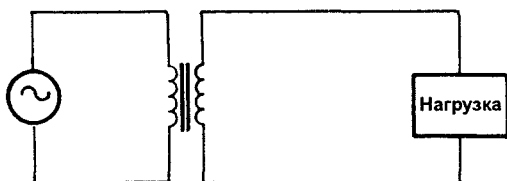


Рис. 18-4. Трансформатор с нагрузкой во вторичной обмотке.

18-2. Вопросы

1. Как нагрузка влияет на работу трансформатора?
2. Дайте определение *взаимоиндукции*.



3. Опишите, как трансформатор индуцирует напряжение во вторичной обмотке.

18-3. КОЭФФИЦИЕНТ ТРАНСФОРМАЦИИ

Коэффициент трансформации определяет, является ли трансформатор повышающим, понижающим или пропускает напряжение неизменным. **Коэффициент трансформации** — это отношение числа витков вторичной обмотки к числу витков первичной обмотки:

$$\text{Коэффициент трансформации} = \frac{N_s}{N_p},$$

где N_s — число витков во вторичной обмотке, а N_p — в первичной.

Трансформатор, у которого напряжение во вторичной обмотке больше, чем в первичной, называется **повышающим трансформатором**. Степень повышения напряжения зависит от коэффициента трансформации. Отношение напряжения вторичной обмотки к напряжению первичной обмотки равно отношению чисел витков этих обмоток:

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{N_s}{N_p}.$$

Следовательно, коэффициент трансформации повышающего трансформатора всегда больше единицы.

ПРИМЕР: Трансформатор имеет 400 витков первичной обмотки и 1200 витков вторичной. Если к первичной обмотке приложить переменное напряжение 120 вольт, то какое напряжение индуцируется во вторичной?

Дано:

Решение:

$$E_s = ?$$

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$E_p = 120 \text{ Вольт}$$

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$N_s = 1200 \text{ витков}$$

$$\frac{E_s}{120} = \frac{1200}{400}$$

$$N_p = 400 \text{ витков.}$$

$$\frac{E_s}{120} = \frac{1200}{400}$$

$$E_s = 360 \text{ В.}$$

Трансформатор, у которого напряжение во вторичной обмотке меньше, чем в первичной, называется **понижающим трансформатором**. Степень понижения напряжения



определяется коэффициентом трансформации. Коэффициент трансформации понижающего трансформатора всегда меньше единицы.

ПРИМЕР: Трансформатор имеет 500 витков первичной обмотки и 100 витков вторичной. Если к первичной обмотке приложить переменное напряжение 120 вольт, то какое напряжение индуцируется во вторичной ?

Дано:

Решение:

$$E_s = ?$$

$$E_p = 120 \text{ В}$$

$$N_s = 100 \text{ витков}$$

$$N_p = 500 \text{ витков}$$

$$\frac{E_s}{E_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{E_s}{120} = \frac{100}{500}$$

$$E_s = 24 \text{ В.}$$

Если предположить, что трансформатор не имеет потерь, то мощность во вторичной обмотке должна равняться мощности в первичной. Хотя трансформатор может повышать напряжение, он не может увеличивать мощность. Мощность, снимаемая со вторичной обмотки никогда не может быть больше мощности, потребляемой первичной обмоткой. Следовательно, когда трансформатор повышает напряжение, он понижает ток, и выходная мощность остается равной входной. Это может быть выражено следующим образом:

$$P_p = P_s,$$
$$(I_p)(E_p) = (I_s)(E_s).$$

Следовательно, ток обратно пропорционален коэффициенту трансформации:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}.$$

ПРИМЕР: Трансформатор имеет коэффициент трансформации 10:1. Если по первичной обмотке течет ток 100 миллиампер, то какой ток течет по вторичной обмотке? (Замечание: первая цифра в коэффициенте трансформации относится к первичной обмотке, а вторая цифра — ко вторичной).

*Дано:*

$$I_s = ?$$

$$N_p = 10$$

$$N_s = 1$$

$$I_p = 100 \text{ мА} = \\ = 0,1 \text{ А.}$$

Решение:

$$\frac{I_p}{I_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

$$\frac{0,1}{I_s} = \frac{1}{10}$$

$$I_s = 1 \text{ А.}$$

Важным применением трансформаторов является согласование импедансов. Максимальная мощность передается только тогда, когда импеданс нагрузки равен импедансу источника сигнала. Когда импедансы не согласованы, мощность передается не полностью.

Например, если транзисторный усилитель может эффективно возбуждать 100-омный усилитель, то он не сможет эффективно раскачать 4-омный громкоговоритель. Использование трансформатора между транзисторным усилителем и громкоговорителем поможет согласовать импедансы. Это достигается выбором соответствующего коэффициента трансформации.

Отношение импедансов равно квадрату коэффициента трансформации:

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2.$$

ПРИМЕР: Какой должен быть коэффициент трансформации трансформатора для согласования 4-омного громкоговорителя с 100-омным источником сигнала ?

Дано:

$$N_p = ?$$

$$N_s = ?$$

$$Z_p = 100$$

$$Z_s = 4.$$

Решение:

$$\frac{Z_p}{Z_s} = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

$$\frac{100}{4} = \left(\frac{N_p}{N_s} \right)^2$$

$$\sqrt{25} = \frac{N_p}{N_s}$$



$$\frac{5}{1} = \frac{N_p}{N_s}.$$

Коэффициент трансформации равен 5:1.

18-3. Вопросы

1. Чем определяется, какой это трансформатор — повышающий или понижающий?
2. Напишите формулу для определения коэффициента трансформации трансформатора.
3. Напишите формулу для определения напряжения через коэффициент трансформации трансформатора.
4. Чему равно напряжение на вторичной обмотке трансформатора, имеющего 100 витков первичной обмотки и 1800 витков вторичной, при приложенном напряжении 120 вольт?

18-4. ПРИМЕНЕНИЯ

Трансформаторы имеют множество применений. Среди них: повышение и понижение напряжения и тока, согласование импедансов, сдвиг фаз, гальваническая развязка, блокирование постоянного тока при пропускании переменного и вывод нескольких сигналов с разными уровнями напряжения.

Передача электроэнергии к потребителям требует использования трансформаторов. Электростанции расположены рядом с источниками сырья и природной энергии, и электроэнергия часто должна передаваться на большие расстояния. Провода, используемые для передачи энергии, имеют сопротивление, приводящее к потерям мощности при передаче. Мощность равна произведению тока на напряжение:

$$P = IE.$$

Закон Ома утверждает, что ток прямо пропорционален напряжению и обратно пропорционален сопротивлению:

$$I = \frac{E}{R}.$$



Следовательно, величина потерь мощности пропорциональна сопротивлению линии. Самый легкий путь уменьшения потерь мощности — это уменьшение тока.

ПРИМЕР: Электростанция вырабатывает 8500 вольт при 10 амперах. Сопротивление линии передачи 100 ом. Чему равны потери мощности в линии?

Дано:

$$P = ?$$

$$I = 10 \text{ A}$$

$$E = ?$$

$$R = 100 \text{ Ом.}$$

Решение:

Сначала найдем падение напряжения на линии.

$$I = \frac{E}{R}$$

$$10 = \frac{E}{100}$$

$$E = 1000 \text{ В.}$$

Используя E , найдем потерю мощности.

$$P = IE = (10)(1000)$$

$$P = 10000 \text{ Вт.}$$

Каковы будут потери мощности, если мы с помощью трансформатора повысим напряжение до 85000 вольт при 1 ампере?

Дано:

$$I = 1 \text{ A}$$

$$E = ?$$

$$R = 100 \text{ Ом.}$$

Решение:

Сначала найдем падение напряжения на линии.

$$I = \frac{E}{R}$$

$$1 = \frac{E}{100}$$

$$E = 100 \text{ В.}$$

Используя E , найдем потерю мощности.

$$P = IE = (1)(100)$$

$$P = 100 \text{ Вт.}$$



Способ намотки трансформатора определяет, будет ли он производить фазовый сдвиг напряжения обмоток. Знак фазового сдвига определяет тип включения трансформатора. Замечание: знак фазы можно изменить, поменяв местами выводы на нагрузке (рис. 18-5).

Если к трансформатору приложить постоянное напряжение, то после установления магнитного поля во вторичной обмотке э.д.с. наводиться не будет. Для индуцирования напряжения во вторичной обмотке необходимо изменение тока. Трансформатор можно использовать для гальванической развязки вторичной обмотки и любого постоянного напряжения в первичной (рис. 18-6).

Трансформаторы используются для гальванической развязки электронного оборудования и сети переменного тока 120 вольт, 60 герц при его тестировании (рис. 18-7). Причина использования трансформатора — предотвращение поражения электрическим током. Без трансформатора один вывод источника тока соединяется с шасси прибора. Когда шасси удаляется из корпуса, появляется опасность поражения электрическим током. Это может произойти с большей вероятностью, если сетевой шнур подключен определенным образом. Трансформатор предотвращает электрический контакт оборудования с землей. **Развязывающий трансформатор** не повышает и не понижает напряжение.

Автотрансформатор — это устройство, используемое для повышения или понижения приложенного напряжения и представляющее собой специальный трансформатор, в ко-

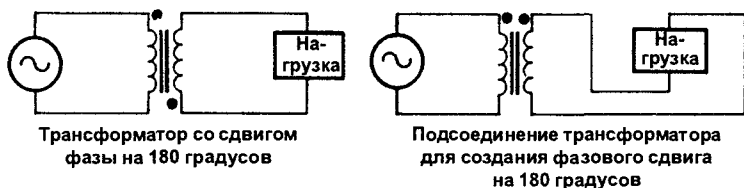


Рис. 18-5. Трансформатор можно использовать для создания фазового сдвига.

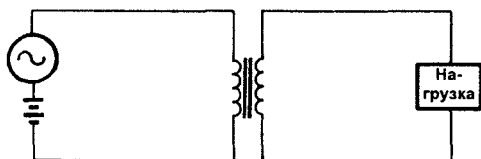
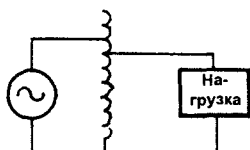
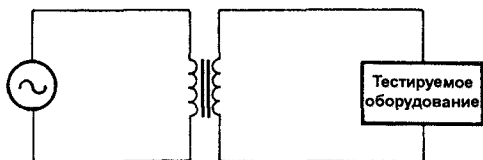
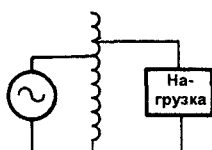


Рис. 18-6. Трансформатор может быть использован для блокирования постоянного напряжения.

Рис. 18-7. Трансформатор гальванической развязки предотвращает поражение электрическим током, изолируя оборудование от земли.



(А) Понижение напряжения



(В) Повышение напряжения

Рис. 18-8. Автотрансформатор — это специальный трансформатор, который используется для повышения и понижения напряжения.

тором одна обмотка является частью другой. На рис. 18-8(А) изображен автотрансформатор, понижающий напряжение. Напряжение понижается потому, что вторичная обмотка содержит меньшее число витков. На рис. 18-8(Б) изображен автотрансформатор, повышающий напряжение. Напряжение повышается потому, что вторичная обмотка содержит большее число витков. Недостаток автотрансформатора в том, что вторичная обмотка не изолирована от первичной. Преимущество — он дешевле и проще в изготовлении, чем трансформатор.

Специальным типом автотрансформатора является переменный автотрансформатор, в котором нагрузка подключается к подвижному рычагу и одному из выводов автотрансформатора. Перемещение рычага изменяет коэффициент трансформации и, следовательно, напряжение на нагрузке. Выходное напряжение может изменяться от 0 до 130 вольт переменного тока.

**18-4. Вопросы**

1. Где применяются трансформаторы?
2. Как трансформаторы используются при передаче электроэнергии?
3. Как трансформатор производит фазовый сдвиг входного сигнала?
4. Почему важно использовать трансформаторы гальванической развязки при работе с электронным оборудованием?
5. Для чего используется автотрансформатор?

РЕЗЮМЕ

- Трансформатор состоит из двух катушек — первичной обмотки и вторичной обмотки.
- Переменное напряжение прикладывается к первичной обмотке, индуцируя напряжение во вторичной обмотке.
- Трансформаторы позволяют передавать сигнал переменного тока от одной цепи к другой.
- Трансформаторы позволяют повышать напряжение, понижать напряжение или оставлять его неизменным.
- Трансформаторы рассчитаны на работу при определенных частотах.
- Мощность трансформаторов измеряется в вольт-амперах (ВА).
- Схематическим обозначением трансформатора является:



- Коэффициент трансформации определяет, является трансформатор повышающим, понижающим или оставляет напряжение неизменным.

$$\text{Коэффициент трансформации} = \frac{N_s}{N_p}.$$



- Отношение напряжения вторичной обмотки к напряжению первичной обмотки равно отношению чисел витков этих обмоток:

$$\frac{E_S}{E_P} = \frac{N_S}{N_P}.$$

- Трансформатор, у которого напряжение на вторичной обмотке больше, чем на первичной, называется повышающим трансформатором.
- Коэффициент трансформации повышающего трансформатора всегда больше единицы.
- Трансформатор, у которого напряжение на вторичной обмотке меньше, чем на первичной, называется понижающим трансформатором.
- Коэффициент трансформации понижающего трансформатора всегда меньше единицы.
- Величина повышенного или пониженного напряжения определяется коэффициентом трансформации.
- Применения трансформаторов включают: согласование импедансов, сдвиг фаз, гальваническую развязку, блокирование постоянного и пропускание переменного токов и вывод нескольких сигналов с разными уровнями напряжения.
- Трансформатор гальванической развязки пропускает сигнал неизменным.
- Трансформатор гальванической развязки используется для предотвращения поражения электрическим током.
- Автотрансформатор используется для повышения и понижения напряжения.
- Автотрансформатор — это специальный трансформатор, который не обеспечивает гальваническую развязку.

Глава 18. САМОПРОВЕРКА

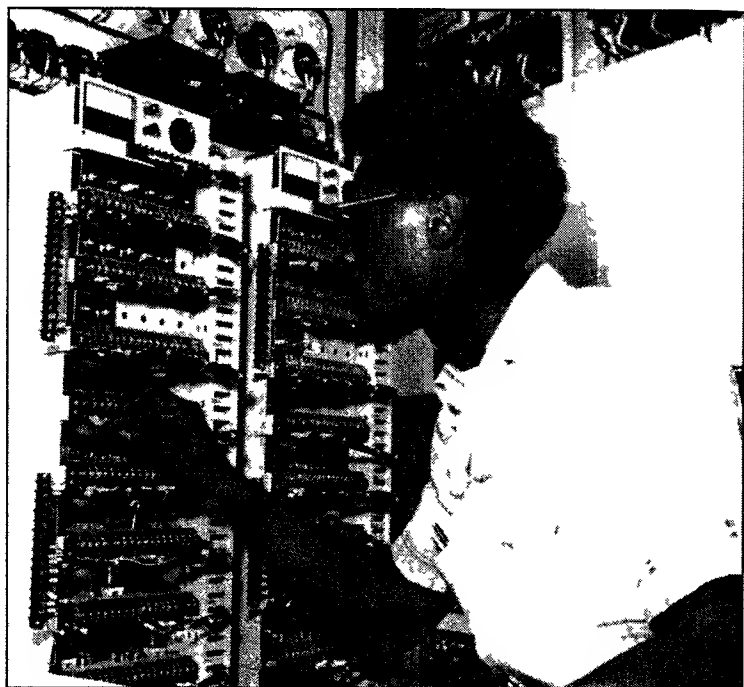
1. Объясните, как электромагнитная индукция индуцирует напряжение во вторичной обмотке трансформатора.
2. Почему мощность трансформаторов измеряется в вольтамперах, а не в ваттах?



3. Чем отличаются два трансформатора, один из которых при приложенном напряжении к первичной обмотке не имеет нагрузки во вторичной обмотке, а второй имеет нагрузку?
4. К первичной обмотке трансформатора приложено переменное напряжение 120 вольт, а напряжение на вторичной — 12 вольт. Какое количество витков имеет вторичная обмотка, если первичная содержит 400 витков?
5. Какой коэффициент трансформации должен иметь трансформатор для согласования 4-омного громкоговорителя с 16-омным источником сигнала?
6. Объясните, почему трансформаторы играют важную роль при передаче электроэнергии потребителям.
7. Каким образом трансформатор гальванической развязки предотвращает поражение электрическим током?

Раздел 3.

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ПРИБОРЫ



Специальность — техник по электронике

Техники по электронике совершенствуют, производят и обслуживают электронное оборудование, используя при этом сложное измерительное и диагностическое оборудование для проверки, настройки и ремонта электронного оборудования. Это оборудование включает радио, радиолокацию, системы звуковой локации, телевидение, компьютеры, а также промышленные и медицинские контрольно-измерительные устройства.

Техники помогают инженерам устанавливать оборудование, ставить эксперименты и вычислять результаты. Они также помогают инженерам в изготовлении макетов разработанного оборудования и выполняют стандартные работы по проектированию. Некоторые техники по электронике работают продавцами или представителями фирм для того, чтобы давать советы по установке и эксплуатации сложного оборудования. Большинство техников по электронике работают в лабораториях, магазинах по продаже электроники или на промышленных предприятиях; девяносто процентов работают на частных предприятиях.

Чтобы стать техником по электронике, необходимо пройти официальную подготовку. Такую подготовку дают военные колледжи, профессионально-технические школы или домашние учебные программы.

Ожидается, что потребность в техниках по электронике к 2000 году увеличится. Это обусловлено растущими



потребностями в компьютерах, коммуникационном оборудовании, военной электронике и в бытовой электронной технике. Увеличение потребности в технике обеспечит возможности работы, возникнет необходимость в замене техников, которые получили повышение, ушли на другую работу или вообще ее оставили.

Глава 19.

ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить полупроводниковые материалы.
- Дать определение *ковалентной связи*.
- Описать процесс легирования для получения полупроводниковых материалов n-типа и p-типа.
- Объяснить, как легирование поддерживает ток в полупроводниковых материалах.

Полупроводники являются основными компонентами электронного оборудования. Наиболее часто используются полупроводниковые *диоды* (для выпрямления сигналов), *транзисторы* (используются для усиления сигналов) и *интегральные микросхемы* (используются для переключения схем или усиления сигналов). Основная функция полупроводниковых приборов — управление напряжением или током для получения желаемого результата.

Полупроводники имеют следующие преимущества:

- Малые размеры и вес.
- Низкую потребляемую мощность при низком напряжении.
- Высокий коэффициент полезного действия.
- Высокую надежность.
- Способность работать в сложных условиях.
- Немедленно начинают работать при включении питания.
- Недорогое массовое производство.

Полупроводники имеют следующие недостатки:

- Высокую восприимчивость к изменениям температуры.
- Для стабилизации режима необходимы дополнительные компоненты.



- Легко повреждаются (при превышении допустимых пределов по току или напряжению, при перемене полярности питающего напряжения, от перегрева при пайке).

19-1. ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ СВОЙСТВА ГЕРМАНИЯ И КРЕМНИЯ

Проводимость полупроводниковых материалов лежит между проводимостью изоляторов и проводников. Чистыми полупроводниковыми элементами являются углерод (C), германий (Ge) и кремний (Si). Наиболее подходят для применения в электронике германий и кремний.

Германий — это хрупкий серовато-белый элемент, открытый в 1886 году. Порошкообразную двуокись германия получают из золы некоторых сортов угля. Из этого порошка получают твердый чистый германий.

Кремний был открыт в 1823 году. Он широко распространен в земной коре в виде белого или иногда бесцветного соединения — двуокиси кремния. Двуокисью кремния богат песок, кварц, агат и кремень. Из двуокиси кремния химическим путем получают чистый кремний. Кремний является наиболее широко используемым полупроводниковым материалом.

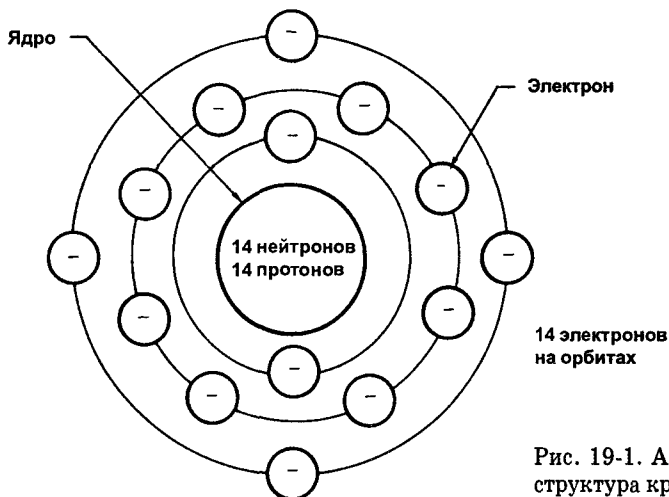


Рис. 19-1. Атомная структура кремния.

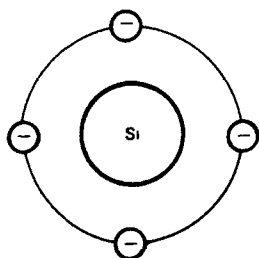


Рис. 19-2. Упрощенная схема атома кремния, на которой показаны только валентные электроны.

Полупроводниковый материал после получения должен быть модифицирован, чтобы он приобрел качества, необходимые для полупроводниковых устройств.

Как описано в главе 1, в центре атома находится ядро, которое содержит протоны и нейтроны. Протоны имеют положительный заряд, а нейтроны заряда не имеют. Электроны движутся по орбитам вокруг ядра и имеют отрицательный заряд. На рис. 19-1 показана структура атома кремния. Первая орбита содержит два электрона, вторая орбита восемь, а внешняя орбита или валентная оболочка содержит четыре электрона. **Валентность** — это показатель способности атома присоединять или отдавать электроны, она определяет электрические и химические свойства атома. На рис. 19-2 показана упрощенная схема атома кремния, на которой изображено только четыре электрона на валентной оболочке.

Материалы, которым необходимы электроны для заполнения их валентной оболочки, являются нестабильными и относятся к *активным материалам*. Для приобретения стабильности, активные материалы должны добавить электроны в свои валентные оболочки. Атомы кремния способны объединить свои валентные электроны с другими атомами кремния с помощью процесса, который называется ковалентной связью (рис. 19-3). **Ковалентная связь** — это процесс совместного использования валентных электронов различными атомами, приводящий к образованию кристалла.

Каждый атом в такой кристаллической структуре имеет четыре своих собственных электрона и четыре совместно используемых электрона от четырех других атомов, а всего — восемь валентных электронов. Ковалентная связь ввиду своей стабильности не может поддерживать электрическую активность.

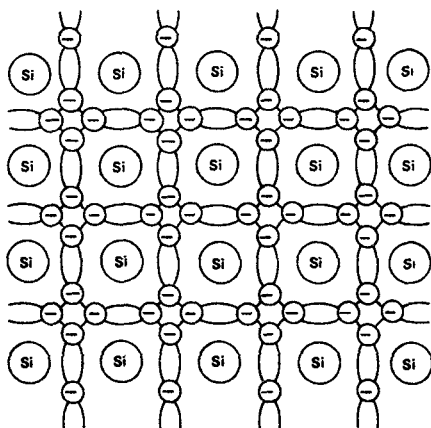


Рис. 19-3. Кристаллическая структура кремния с ковалентными связями.

При комнатной температуре кристаллы чистого кремния являются плохими проводниками. Они ведут себя, как изоляторы. Однако если кристаллу сообщить тепловую энергию, то некоторые электроны получают эту энергию и переместятся на более высокую орбиту, нарушая ковалентную связь. Это позволяет кристаллу проводить ток.

Кремний, подобно другим полупроводниковым материалам, имеет **отрицательный температурный коэффициент сопротивления**, потому что при повышении температуры его сопротивление уменьшается. Сопротивление кремния падает в два раза при каждом повышении температуры на 6 градусов Цельсия.

Как и кремний, германий имеет четыре электрона на валентной оболочке и может образовывать кристаллическую структуру. Сопротивление германия падает в два раза при каждом повышении температуры на 10 градусов Цельсия. Таким образом, германий является более стабильным по отношению к изменениям температуры, чем кремний. Однако германий требует меньше тепловой энергии для освобождения электронов, чем кремний. При комнатной температуре кремний имеет в тысячу раз большее сопротивление, чем германий.

Тепло при работе с полупроводниками является потенциальным источником трудностей, который нелегко под-



дается контролю. Правильный расчет цепи минимизирует влияние изменений температуры. Высокое сопротивление — вот что дает преимущество кремнию перед германием в большинстве цепей. В тех цепях, где температурный коэффициент сопротивления германия имеет преимущество, используется германий.

Все первые транзисторы были сделаны из германия. Кремниевых транзисторов не было до 1954 года. В настоящее время в большинстве случаев используются кремниевые полупроводниковые приборы.

19-1. Вопросы

1. Что такое полупроводниковый материал?
2. Дайте определения следующим терминам:
 - а. Ковалентная связь.
 - б. Отрицательный температурный коэффициент сопротивления.
3. Почему кремний и германий считаются полупроводниковыми материалами?
4. Почему кремний предпочтительней германия?

19-2. ПРОВОДИМОСТЬ В ЧИСТОМ ГЕРМАНИИ И КРЕМНИИ

Электрическая активность полупроводниковых материалов сильно зависит от температуры. При крайне низких температурах валентные электроны сильно связаны с атомами ковалентными связями. Поскольку эти валентные электроны не способны дрейфовать, материал не может проводить электрический ток. Кристаллы германия и кремния при низких температурах являются изоляторами.

При повышении температуры валентные электроны приобретают дополнительную энергию. Некоторые электроны разрывают ковалентные связи и хаотично дрейфуют от атома к атому. Эти свободные электроны в состоянии поддерживать небольшой электрический ток, если приложено



напряжение. При комнатной температуре тепловой энергии достаточно для того, чтобы создать небольшое количество свободных электронов и поддерживать небольшой ток. При увеличении температуры материал начинает приобретать характеристики проводника. Но только при очень высоких температурах кремний проводит ток, как обычный проводник. Обычно, при нормальных условиях эксплуатации такие высокие температуры не встречаются.

Когда электрон разрывает ковалентную связь и уходит от атома, пространство, которое он занимал прежде, называют дыркой (рис. 19-4). Как отмечалось в главе 2, **дырка** — это просто отсутствие электрона. Поскольку электрон имеет отрицательный заряд, его отсутствие представляет собой потерю отрицательного заряда, и, следовательно, дырка может считаться положительно заряженной частицей. Если электрон перемещается от одной валентной оболочки к другой, он оставляет за собой дырку. Если это движение непрерывно, то дырка движется в направлении, противоположном направлению движения электрона.

Каждый электрон и соответствующая ему дырка называются *электронно-дырочной парой*. Количество электронно-дырочных пар увеличивается при увеличении темпера-

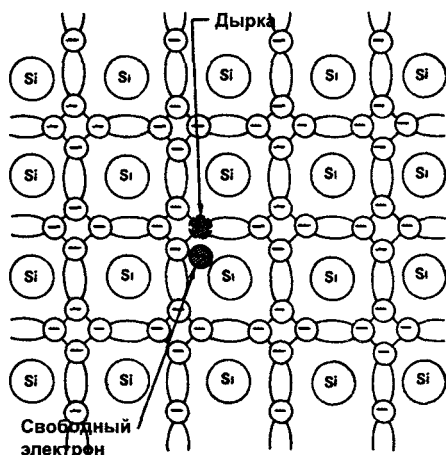


Рис. 19-4. Дырка образуется, когда электрон разрывает свою ковалентную связь.

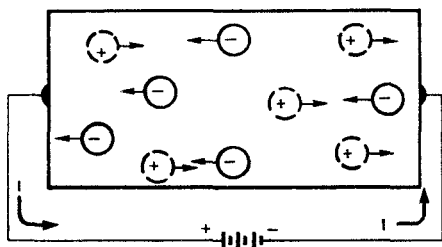


Рис. 19-5. Ток в чисто полупроводниковом материале.

туры. При комнатной температуре существует небольшое количество электронно-дырочных пар.

Когда к чистому полупроводниковому материалу приложено напряжение, свободные электроны притягиваются к положительному выводу источника тока (рис. 19-5). Дырки, созданные движением свободных электронов, дрейфуют по направлению к отрицательному выводу. Сколько электронов втекает в положительный вывод, столько же электронов покидает отрицательный вывод источника. После рекомбинации электроны и дырки перестают существовать.

Короче говоря, дырки постоянно дрейфуют по направлению к отрицательному выводу источника тока. Электроны всегда движутся по направлению к положительному выводу. Ток, текущий через полупроводник, состоит из движения и электронов, и дырок. Величина тока определяется количеством электронно-дырочных пар в материале. Способность поддерживать ток увеличивается при увеличении температуры материала.

19-2. Вопросы

1. Как чистый германий может поддерживать ток?
2. Когда к чистому германию приложена разность потенциалов, в каком направлении двигаются электроны и дырки?
3. Что определяет величину тока в чистом полупроводниковом материале?



19-3. ПРОВОДИМОСТЬ В ЛЕГИРОВАННОМ ГЕРМАНИИ И КРЕМНИИ

Чистые полупроводники являются объектом, главным образом, теоретического интереса. Основные исследования полупроводников связаны с влиянием добавления примесей в чистые материалы. Если бы этих примесей не было, то большинства полупроводниковых приборов не существовало бы.

Чистые полупроводниковые материалы, такие как германий и кремний, содержат при комнатной температуре небольшое количество электронно-дырочных пар и поэтому могут проводить очень маленький ток. Для увеличения проводимости чистых материалов используется процесс, называемый легированием.

Легирование — это процесс добавления примесей в полупроводниковый материал. Используются два типа примесей. Первая, которая называется **пятивалентной**, состоит из атомов с пятью валентными электронами. Примерами являются мышьяк и сурьма. Вторая, называемая **трехвалентной**, состоит из атомов с тремя валентными электронами. Примерами являются индий и галлий.

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пятивалентным материалом, таким как мышьяк (As), некоторые атомы полупроводника замещаются атомами мышьяка (рис. 19-6). Атом мышьяка размещает четыре своих валентных электрона в ковалентные связи с соседними атомами. Его пятый электрон слабо связан с ядром и легко может стать свободным.

Атом мышьяка называется *донорским атомом*, поскольку он отдает свой лишний электрон. В легированном полупроводниковом материале находится много донорских атомов. Это означает, что для поддержки тока имеется много свободных электронов.

При комнатной температуре количество дополнительных свободных электронов превышает количество электронно-дырочных пар. Это означает, что в материале боль-

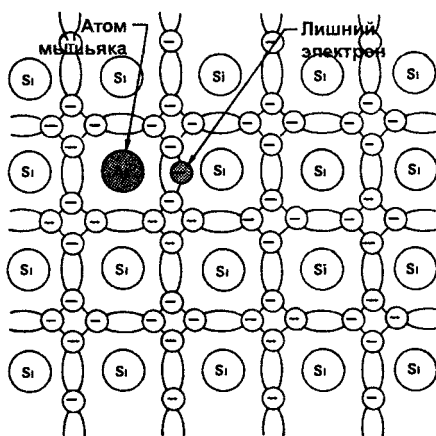


Рис. 19-6. Кремний, легированный атомом мышьяка.

ше электронов, чем дырок. Следовательно, электроны называются *основными носителями*. Дырки называются *неосновными носителями*. Поскольку основные носители имеют отрицательный заряд, материал называется полупроводником *n-типа*.

Если к полупроводнику *n-типа* приложено напряжение (рис. 19-7), то свободные электроны, добавленные донорскими атомами, начнут двигаться по направлению к положительному выводу. Кроме того, к положительному выводу начнут двигаться электроны, которые смогут разрушить свои ковалентные связи. Эти электроны, разрушив ковалентные связи, создадут электронно-дырочные пары. Соответствующие дырки будут двигаться по направлению к отрицательному выводу.

Когда полупроводниковый материал легирован трехвалентным материалом, таким, как индий (In), атомы индия

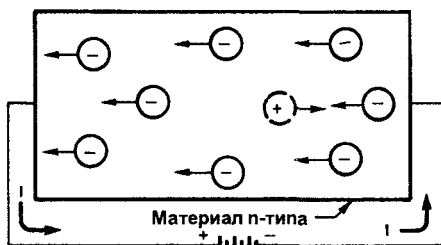


Рис. 19-7. Ток в полупроводнике *n-типа*.

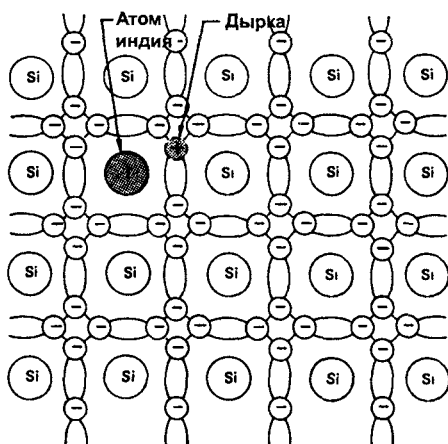


Рис. 19-8. Кремний, легированный атомом индия.

разместят свои три валентных электрона среди трех соседних атомов (рис. 19-8). Это создаст в ковалентной связи дырку.

Наличие дополнительных дырок позволит электронам легко дрейфовать от одной ковалентной связи к другой. Так как дырки легко принимают электроны, атомы, которые вносят в полупроводник дополнительные дырки называются *акцепторными*.

При обычных условиях количество дырок в таком материале значительно превышает количество электронов. Следовательно, дырки являются основными носителями, а электроны — неосновными. Поскольку основные носители имеют положительный заряд, материал называется полупроводником **p-типа**.

Если к полупроводнику p-типа приложено напряжение, дырки начинают двигаться по направлению к отрицательному выводу, а электроны — по направлению к положительному выводу (рис. 19-9). Кроме дырок, которые создали акцепторные атомы, возникают дырки, образованные из-за разрыва ковалентных связей, создающие электронно-дырочные пары.

Полупроводниковые материалы n-типа и p-типа имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые по-

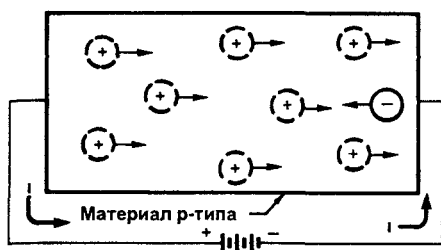


Рис. 19-9. Ток в полупроводнике р-типа.

лупроводниковые материалы. Эта проводимость может быть увеличена или уменьшена путем изменения количества примесей. Чем сильнее полупроводниковый материал легирован, тем меньше его электрическое сопротивление.

19-3. Вопросы

1. Опишите процесс легирования полупроводникового материала.
2. Какие два типа примесей используются для легирования?
3. Что определяет тип проводимости (n-тип или p-тип) легированного полупроводника?
4. Как легирование поддерживает ток в полупроводниковом материале?
5. Чем определяется проводимость полупроводникового материала?

РЕЗЮМЕ

- Полупроводниковыми материалами являются любые материалы, проводимость которых лучше проводимости изоляторов, но хуже проводимости проводников.
- Чисто полупроводниковыми материалами являются углерод (C), германий (Ge) и кремний (Si).
- В большинстве полупроводниковых приборов используется кремний.
- Валентность — это показатель способности атома присоединять или отдавать электроны.



- Полупроводниковые материалы имеют наполовину заполненные валентные оболочки.
- Кристаллы образуются из атомов, которые совместно используют свои валентные электроны путем образования ковалентных связей.
- Полупроводниковые материалы имеют отрицательный температурный коэффициент сопротивления: при повышении температуры их сопротивление падает.
- Тепло создает проблемы в полупроводниковых материалах, позволяя электронам разрывать ковалентные связи.
- При повышении температуры, электроны в полупроводниковом материале дрейфуют от одного атома к другому.
- Дырка представляет собой отсутствие электрона в валентной оболочке.
- Разность потенциалов, приложенная к чисто полупроводниковому материалу, создает поток электронов, движущийся к положительному выводу и поток дырок, движущийся к отрицательному выводу.
- Ток в полупроводниковых материалах состоит из направленного движения электронов и направленного движения дырок.
- Легирование — это процесс добавления примесей в полупроводниковый материал.
- Трехвалентные материалы имеют атомы с тремя валентными электронами и используются для изготовления полупроводников р-типа.
- Пятивалентные материалы имеют атомы с пятью валентными электронами и используются для изготовления полупроводников n-типа.
- В полупроводнике n-типа электроны являются основными носителями, а дырки — неосновными носителями.
- В полупроводнике р-типа дырки являются основными носителями, а электроны — неосновными носителями.
- Полупроводниковые материалы n- и р-типа имеют значительно более высокую проводимость, чем чистые полупроводниковые материалы.



Глава 19. САМОПРОВЕРКА

1. Что делает кремний более желательным для использования, чем германий?
2. Почему при образовании полупроводниковых материалов важна ковалентная связь?
3. Опишите, как перемещаются электроны в образце чистого кремния при комнатной температуре?
4. Опишите процесс превращения образца чистого кремния в полупроводник n-типа.
5. Опишите, что случится в образце полупроводника n-типа, когда к нему будет приложено напряжение?

Глава 20.

ДИОДЫ НА ОСНОВЕ p-n ПЕРЕХОДА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать, что такое диод на основе p-n перехода, и как его изготавливают.
- Дать определение *обедненного слоя* и *потенциального барьера*.
- Объяснить разницу между прямым смещением диода и обратным.
- Нарисовать схематическое обозначение диода и указать его электроды.
- Описать три конструкции диода.
- Перечислить чаще всего встречающиеся корпуса диодов.
- Проверить диоды с помощью омметра.

Диод — это простейший полупроводниковый прибор. Он позволяет току течь только в одном направлении. Знания, полученные при изучении диодов применимы также к другим типам полупроводниковых приборов.

20-1. p-n ПЕРЕХОД

Когда чистый полупроводниковый материал легируется пятивалентным или трехвалентным материалом, легированный материал называется полупроводником n- или p-типа, в зависимости от того, какие носители являются основными. В целом образец полупроводника любого типа является нейтральным, так как каждый атом содержит одинаковое число протонов и электронов.

Независимые электрические заряды существуют в полупроводниковых материалах каждого типа, так как электроны могут свободно дрейфовать. Дрейфующие электроны и дырки называются *подвижными зарядами*. Кро-



ме подвижных зарядов, каждый атом, который теряет электрон, считается положительным зарядом, так как он имеет больше протонов, чем электронов. Аналогично, каждый атом, который присоединяет электрон, имеет больше электронов, чем протонов и считается отрицательным зарядом. Как указывалось в главе 1, эти заряженные атомы называются положительными и отрицательными ионами. В полупроводниковых материалах *n*- и *p*-типа всегда содержится равное количество подвижных и ионных зарядов.

Диод создается соединением двух полупроводников *p*- и *p*-типа (рис. 20-1). В месте контакта этих материалов образуется переход. Это устройство называется диодом на основе *p-n* перехода.

При формировании перехода подвижные заряды в его окрестности притягиваются к зарядам противоположного знака и дрейфуют по направлению к переходу. По мере накопления зарядов этот процесс усиливается. Некоторые электроны перемещаются через переход, заполняя дырки вблизи перехода в материале *p*-типа. В материале *n*-типа в области перехода электронов становится меньше. Эта область перехода, где концентрация электронов и дырок уменьшена, называется **обедненным слоем**. Он занимает небольшую область с каждой стороны перехода.

В обедненном слое нет основных носителей, и материалы *n*-типа и *p*-типа не являются больше электрически нейтральными. Материал *n*-типа становится положительно заряженным вблизи перехода, а материал *p*-типа — отрицательно заряженным.



Рис. 20-1. Диод создается соединением вместе двух материалов *p*- и *n*-типа, образующих *p-n* переход.



Обедненный слой не может стать больше. Взаимодействие зарядов быстро ослабевает при увеличении расстояния, и слой остается малым. Размер слоя ограничен зарядами противоположного знака, расположенными по обе стороны перехода. Как только отрицательные заряды располагаются вдоль перехода, они отталкивают другие электроны и не дают им пересечь переход. Положительные заряды поглощают свободные электроны и также не дают им пересечь переход.

Эти заряды противоположного знака, выстроившиеся с двух сторон перехода, создают напряжение, называемое **потенциальным барьером**. Это напряжение может быть представлено как внешний источник тока, хотя существует только на р-п переходе (рис. 20-2).

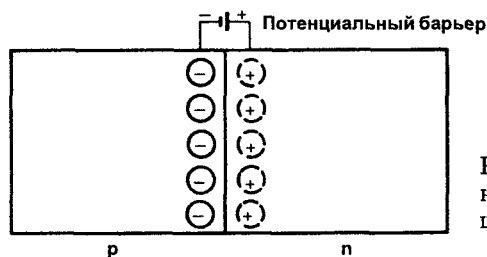


Рис. 20-2. Потенциальный барьер, существующий вблизи р-п перехода.

Потенциальный барьер довольно мал, его величина составляет только несколько десятых долей вольта. Типичные значения потенциального барьера — 0,3 вольта для р-п перехода в германии, и 0,7 вольта для р-п перехода в кремнии. Потенциальный барьер проявляется, когда к р-п переходу прикладывается внешнее напряжение.

20-1. Вопросы

1. Дайте определения следующих терминов:
 - а. Донорный атом;
 - б. Акцепторный атом;
 - в. Диод.
2. Что происходит, когда создается контакт материала п-типа и материала р-типа?



3. Как образуется обедненный слой?
4. Что такое потенциальный барьер?
5. Каковы типичные значения потенциального барьера для германия и кремния?

20-2. СМЕЩЕНИЕ ДИОДА

Напряжение, приложенное к диоду, называется **напряжением смещения**. На рис. 20-3 показан диод на основе р-п перехода, соединенный с источником тока. Резистор добавлен для ограничения тока до безопасного значения.

В изображенной цепи отрицательный вывод источника тока соединен с материалом п-типа. Это заставляет электроны двигаться от вывода по направлению к р-п переходу. Свободные электроны, накопившиеся на р-стороне перехода притягиваются к положительному выводу. Это уменьшает количество отрицательных зарядов на р-стороне, потенциальный барьер уменьшается, что дает возможность для протекания тока. Ток может течь только тогда, когда приложенное напряжение превышает потенциальный барьер.

Источник тока создает постоянный поток электронов, который дрейфует через материал п-типа вместе с содержащимися в нем свободными электронами. Дырки в материале р-типа также дрейфуют по направлению к переходу. Электроны и дырки собираются на переходе и взаимно уничтожаются. Однако в то время как электроны и дырки взаимно компенсируются, на выводах источника тока появляются новые электроны и дырки. Большинство носителей продолжает двигаться по направлению к р-п переходу, пока приложено внешнее напряжение.

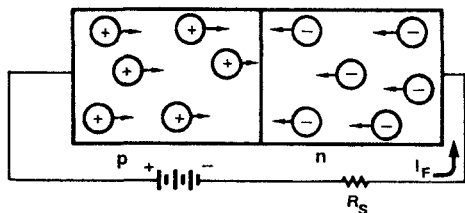


Рис. 20-3. Диод на основе р-п перехода при прямом смещении.



Поток электронов через р-часть диода притягивается к положительному выводу источника тока. Как только электроны покидают материал р-типа, создаются дырки, которые дрейфуют по направлению к р-п переходу, где они взаимно компенсируются с другими электронами. Когда ток течет от материала п-типа к материалу р-типа, то говорят, что диод смещен в **прямом направлении**.

Ток, текущий через диод, смещенный в прямом направлении, ограничен сопротивлением материалов р- и п-типа и внешним сопротивлением цепи. Сопротивление диода невелико. Следовательно, подсоединение источника тока к диоду в прямом направлении создает большой ток. При этом может выделяться такое количество тепла, которого достаточно для разрушения диода. Для того, чтобы ограничить ток, последовательно с диодом необходимо включить резистор.

Диод проводит ток в прямом направлении только тогда, когда величина внешнего напряжения больше потенциального барьера. Германиевый диод требует минимальное прямое смещение 0,3 вольта; кремниевый диод — минимальное прямое смещение 0,7 вольта.

Когда диод начинает проводить ток, на нем появляется падение напряжения. Это падение напряжения равно потенциальному барьеру и называется *прямым падением напряжения* (E_F). Падение напряжения равно 0,3 вольта для германиевого диода и 0,7 вольта для кремниевого диода. Величина прямого тока (I_F) является функцией приложенного напряжения (E), прямого падения напряжения (E_F) и внешнего сопротивления (R). Это соотношение можно получить с помощью закона Ома:

$$I = \frac{E}{R},$$
$$I_F = \frac{E - E_F}{R}.$$

ПРИМЕР: К кремниевому диоду, последовательно соединенному с резистором 150 ом, приложено напряжение смещения 12 вольт. Чему равен прямой ток через диод?



Дано:

$$I_F = ?$$

$$E = 12 \text{ В}$$

$$R = 150 \text{ Ом}$$

$$E_F = 0,7 \text{ В.}$$

Решение:

$$I_F = \frac{E - E_F}{R} = \frac{12 - 0,7}{150}$$

$$I_F = 0,075 \text{ А или } 75 \text{ мА.}$$

В диоде, на который подано напряжение смещения в прямом направлении, отрицательный вывод внешнего источника тока соединен с материалом *n*-типа, а положительный вывод с материалом *p*-типа. Если эти выводы поменять местами, диод не будет проводить ток и про него говорят, что он смещен в **обратном направлении** (рис. 20-4). В этой конфигурации свободные электроны в материале *n*-типа притягиваются к положительному выводу внешнего источника тока, что увеличивает количество положительных ионов в области *p*-*n* перехода, а, следовательно, увеличивает ширину обедненного слоя со стороны материала *n*-типа *p*-*n* перехода. Электроны также покидают отрицательный вывод источника тока и поступают в материал *p*-типа. Эти электроны заполняют дырки вблизи *p*-*n* перехода и служат причиной перемещения дырок по направлению к отрицательному выводу, что увеличивает ширину обедненного слоя со стороны материала *p*-типа *p*-*n* перехода. В результате обедненный слой становится шире, чем в несмещенном или смещенном в прямом направлении диоде.

Приложенное в обратном направлении напряжение смещения увеличивает потенциальный барьер. Если напряжение внешнего источника равно величине потенциального барьера, электроны и дырки не могут поддерживать протекание тока. При обратном напряжении смещения течет

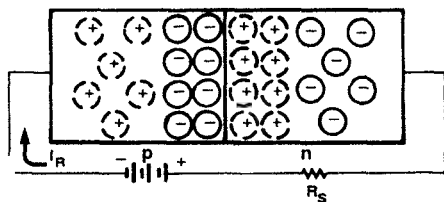


Рис. 20-4. Диод на основе *p*-*n* перехода при обратном смещении.



очень маленький ток, этот ток утечки называется *обратным током* (I_R) и существует благодаря наличию неосновных носителей. При комнатной температуре неосновных носителей очень мало. При повышении температуры создается больше электронно-дырочных пар. Это увеличивает количество основных носителей и ток утечки.

Все диоды с р-п переходом обладают малым током утечки. В германиевых диодах он измеряется в микроамперах; в кремниевых диодах — в наноамперах. Германий имеет больший ток утечки, так как он более чувствителен к температуре. Этот недостаток германия компенсируется его невысоким потенциальным барьером.

Суммируя вышесказанное, можно сказать, что диод на основе р-п перехода является устройством, пропускающим ток только в одном направлении. Когда смещен в прямом направлении — ток течет. Когда смещен в обратном направлении — течет только маленький ток утечки. Это свойство позволяет использовать диод в качестве выпрямителя. Выпрямитель преобразует переменное напряжение в постоянное.

20-2. Вопросы

1. Что такое напряжение смещения?
2. Чему равно минимальное напряжение, необходимое для того, чтобы вызвать ток через диод на основе р-п перехода?
3. В чем разница между прямым и обратным смещением?
4. Что такое ток утечки диода на основе р-п перехода?

20-3. ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

Как германиевый, так и кремниевый диоды могут быть повреждены чрезмерным нагреванием или высоким обратным напряжением. Производители указывают максимальный прямой ток ($I_F \text{ max}$), который может безопасно течь через диод. Они также указывают максимальное обратное напряжение (**пиковое обратное напряжение**). Если превы-



сильное пиковое обратное напряжение, то через диод потечет большой обратный ток, создающий избыточный нагрев и повреждающий диод.

При комнатной температуре обратный ток мал. При повышении температуры обратный ток увеличивается, нарушая работу диода. В германиевых диодах обратный ток выше, чем в кремниевых диодах, удваивается при повышении температуры приблизительно на 10 градусов Цельсия.

Схематическое обозначение диода показано на рис. 20-5. Р-часть представлена стрелкой, а п-часть — чертой. Прямой ток¹ течет от части п к части р (против стрелки). Часть п называется *катодом*, а часть р — *анодом*. Катод поставляет, а анод собирает электроны.



Рис. 20-5. Схематическое обозначение диода.

На рис. 20-6 показано включение диода, смещенного в прямом направлении. Отрицательный вывод источника тока подсоединен к катоду. Положительный вывод подсоединен к аноду. Это позволяет току течь в прямом направлении. Резистор (R_s) включен последовательно с диодом для ограничения прямого тока до безопасного значения.

На рис. 20-7 показано включение диода, смещенного в обратном направлении. Отрицательный вывод источника

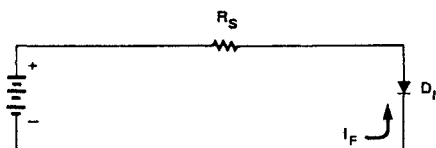
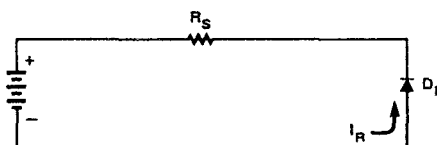


Рис. 20-6. Цепь с диодом, смещенным в прямом направлении.

Рис. 20-7. Цепь с диодом, смещенным в обратном направлении.



¹ Напомним, что речь идет о токе электронов, направление которого противоположно принятому направлению тока (прим. ред.).



тока подсоединен к аноду. Положительный вывод подсоединен к катоду. Через диод, смещенный в обратном направлении течет малый обратный ток (I_R).

20-3. Вопросы

1. Какие проблемы может создать обратный ток в германиевом или кремниевом диоде?
2. Нарисуйте схематическое обозначение диода и обозначьте выводы.
3. Нарисуйте цепь с диодом, смещенным в прямом направлении.
4. Нарисуйте цепь с диодом, смещенным в обратном направлении.
5. Почему в цепь с диодом, смещенным в прямом направлении, должен быть включен резистор?

20-4. МЕТОДЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДИОДОВ

P-n переход диода может быть одного из трех типов: выращенный переход, вплавленный переход или диффузионный переход. Методы изготовления каждого из этих переходов различны.

Метод выращивания перехода (наиболее ранний) состоит в следующем: чистый полупроводниковый материал и примеси p-типа помещаются в кварцевый контейнер и нагреваются до тех пор, пока они не расплавятся. Малый полупроводниковый кристалл, называемый затравкой, помещается в расплавленную смесь. Затравочный кристалл медленно вращается и достаточно медленно вытягивается из расплава, чтобы на нем успел нарасти слой расплавленной смеси. Расплавленная смесь, нарастая на затравочный кристалл, охлаждается и затвердевает. Она имеет такую же кристаллическую структуру, как и затравка. После вытягивания затравка оказывается попеременно легированной примесями n- и p- типов. *Легирование* — это процесс добавления примесей в чистые полупроводниковые кристаллы для увеличения количества свободных электронов или



дырок. Это создает в выращенном кристалле слой n - и p -типов. Таким образом, выращенный кристалл состоит из многих p - n слоев.

Метод создания вплавленного p - n перехода предельно прост. Маленькая гранула трехвалентного материала, такого как индий, размещается на кристалле полупроводника n -типа. Гранула и кристалл нагреваются до тех пор, пока гранула не расплавится сама и частично не расплавит полупроводниковый кристалл. На участке соединения двух материалов образуется материал p -типа. После охлаждения материал перекристаллизовывается и образуется твердый p - n переход.

Диффузионный метод получения p - n перехода наиболее широко используется в настоящее время. Маска с прорезами размещается над тонким срезом полупроводника p - и n -типа, который называется подложкой. После этого подложка помещается в печь и подвергается контакту с примесями, находящимися в газообразном состоянии. При высокой температуре атомы примеси проникают или диффундируют через поверхность подложки. Глубина проникновения контролируется длительностью экспозиции и величиной температуры.

После того, как p - n переход создан, диод должен быть помещен в корпус для того, чтобы защитить его от влияния окружающей среды и механических повреждений. Корпус должен также обеспечить возможность соединения диода с цепью. Вид корпуса определяется назначением или способом применения диода (рис. 20-8). Если через диод должен протекать большой ток, корпус должен быть рассчитан таким образом, чтобы уберечь p - n переход от перегрева. На рис. 20-9 показаны корпуса диодов, рассчитанных на ток

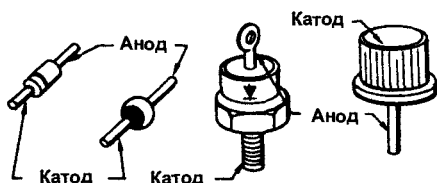


Рис. 20-8. Наиболее часто встречающиеся корпуса диодов.



Рис 20.9. Корпус для диода, рассчитанного на ток менее 3 Ампер.

до 3 ампер или менее. Для идентификации катода с его стороны на корпус нанесена белая или серебристая полоска.

20-4. Вопросы

1. Опишите три метода производства диодов.
2. Какой метод производства диодов предпочтительней других?
3. Нарисуйте четыре распространенных корпуса диодов.
4. Как идентифицируется катод на корпусе диода, рассчитанного на ток менее 3 ампер?

20-5. ПРОВЕРКА ДИОДОВ

Диод можно проверить путем измерения с помощью омметра отношения прямого и обратного сопротивлений. Это отношение показывает способность диода пропускать ток в одном направлении и не пропускать ток в другом направлении.

Германиевый диод имеет низкое прямое сопротивление, порядка сотни ом. Обратное его сопротивление высокое, больше 100000 ом. Прямое и обратное сопротивления кремниевых диодов выше, чем у германиевых. Проверка диода с помощью омметра должна показать низкое прямое сопротивление и высокое обратное сопротивление.

Предостережение: некоторые омметры используют высоковольтные батареи, которые могут разрушить р-п переход.

Полярность выводов омметра определяется цветом соединительных проводов: белый является положительным, а черный — отрицательным. Если положительный вывод омметра соединен с анодом диода, а отрицательный вывод с катодом, то диод смещен в прямом направлении, в этом случае через диод должен протекать ток, и омметр должен показать низкое сопротивление. Если выводы омметра поменять местами, то диод будет смещен в обратном на-



правления, через него должен протекать маленький ток, и омметр должен показать высокое сопротивление.

Если сопротивление диода низкое в прямом и в обратном направлениях, то он, вероятно, закорочен. Если диод имеет высокое сопротивление и в прямом, и в обратном направлениях, то в нем, вероятно, разорвана цепь.

Точная проверка диода может быть проведена с помощью большинства омметров.

Предостережение: некоторые омметры, используемые для поиска неисправностей, имеют на разомкнутых выводах напряжение меньше 0,3 вольта. Приборы такого типа не могут быть использованы для измерения прямого сопротивления диода.

Для того, чтобы через диод протекал ток, приложенное к нему напряжение при измерении прямого сопротивления должно быть больше потенциального барьера диода (0,7 вольта для кремния и 0,3 вольта для германия).

Омметр может также быть использован для определения катода и анода у диода, не имеющего маркировки. Когда омметр показывает низкое сопротивление, то его положительный вывод подсоединен к аноду, а отрицательный — к катоду.

20-5. Вопросы

1. Как проверить диод с помощью омметра?
2. Какие меры предосторожности должны быть предприняты при проверке диодов с помощью омметра?
3. Каковы показания омметра, когда диод закорочен?
4. Каковы показания омметра, когда у диода разорвана цепь?
5. Как можно использовать омметр для определения вывода катода у немаркированного диода?

РЕЗЮМЕ

- Диод создается соединением вместе двух полупроводников *n*- и *p*-типа.



- Область вблизи перехода называется обедненным слоем. Электроны перемещаются через переход из материала *n*-типа в материал *p*-типа, и поэтому концентрация электронов и дырок вблизи перехода уменьшена.
- Размер обедненного слоя ограничен зарядом с каждой стороны перехода.
- Заряды вблизи перехода создают разность потенциалов, которая называется потенциальным барьером.
- Потенциальный барьер составляет 0,3 вольта для германия и 0,7 вольта для кремния.
- Ток может протекать через диод только тогда, когда внешнее напряжение больше потенциального барьера.
- Диод, смещенный в прямом направлении, проводит ток. В этом случае положительный вывод источника тока подсоединяется к материалу *p*-типа, а отрицательный — к материалу *n*-типа.
- Через диод, смещенный в обратном направлении, протекает только маленький ток утечки.
- Диод является устройством, проводящим ток только в одном направлении.
- Максимальный прямой ток диода и максимально допустимое обратное напряжение указываются производителем.
- Схематическим обозначением диода является:



- Катодом диода является материал *n*-типа, а анодом — материал *p*-типа.
- Диоды могут быть изготовлены методом выращивания перехода, методом сплавления перехода и диффузионным методом.
- В настоящее время чаще всего используется диффузионный метод изготовления *p-n* перехода.
- На корпусах диодов, рассчитанных на ток менее 3 ампер, для идентификации катода с его стороны на корпус нанесена белая или серебристая полоска.
- Диод проверяется с помощью омметра путем сравнения прямого и обратного сопротивлений.



- Когда диод смещен в прямом направлении, его сопротивление низкое.
- Когда диод смещен в обратном направлении, его сопротивление высокое.

Глава 20. САМОПРОВЕРКА

1. Каково основное свойство диода на основе р-п перехода?
2. При каких условиях открывается кремниевый диод?
3. Нарисуйте схемы включения диода при прямом и обратном смещении. (Используйте схематические обозначения).

Глава 21. СТАБИЛИТРОНЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать назначение и характеристики стабилитрона.
- Нарисовать схематическое обозначение стабилитрона и пометить его выводы.
- Объяснить, как работает стабилитрон в качестве регулятора напряжения.
- Описать процедуру проверки стабилитронов.

Стабилитроны очень похожи на диоды с р-п переходом. Они сконструированы для пропускания, главным образом, обратного тока. Стабилитроны широко применяются для управления напряжением в цепях любого типа.

21-1. ХАРАКТЕРИСТИКИ СТАБИЛИТРОНОВ

Как установлено ранее, высокое напряжение обратного смещения, приложенное к диоду, может создать сильный обратный ток, который перегреет диод и приведет к пробое диода. Обратное напряжение, при котором наступает пробой, называется *напряжением пробоя* или *максимальным обратным напряжением*. Специальный диод, который называется **стабилитроном**, предназначен для работы в режиме обратного смещения. Он рассчитан для работы при напряжениях, превышающих напряжение пробоя. Эта область пробоя называется **областью стабилизации**.

Когда напряжение обратного смещения достаточно велико для того, чтобы вызвать пробой стабилитрона, через него течет высокий обратный ток (I_r), до наступления пробоя обратный ток невелик. После наступления пробоя обратный ток резко возрастает. Это происходит потому, что



сопротивление стабилитрона уменьшается при увеличении обратного напряжения.

Напряжение пробоя стабилитрона (E_z) определяется удельным сопротивлением диода. Оно, в свою очередь, зависит от техники легирования, использованной при изготовлении диода. Паспортное напряжение пробоя — это обратное напряжение при токе стабилизации (I_{zt}). Ток стабилизации несколько меньше максимального обратного тока диода. Напряжение пробоя обычно указывается с точностью от 1 до 20%.

Способность стабилитрона рассеивать мощность уменьшается при увеличении температуры. Следовательно, *рассеиваемая стабилитроном мощность* указывается для определенной температуры. Величина рассеиваемой мощности также зависит от длины выводов: чем короче выводы, тем большая мощность рассеивается на диоде. *Производитель* указывает также коэффициент отклонения для того, чтобы определить рассеиваемую мощность при других температурах. Например, коэффициент отклонения 6 милливатт на градус Цельсия означает, что рассеиваемая диодом мощность уменьшается на 6 милливатт при повышении температуры на один градус.

Стабилитроны выпускаются в таких же корпусах, что и обычные диоды (рис. 21-1). Маломощные стабилитроны выпускаются в корпусах из стекла или эпоксидной смолы. Мощные стабилитроны выпускаются в металлическом

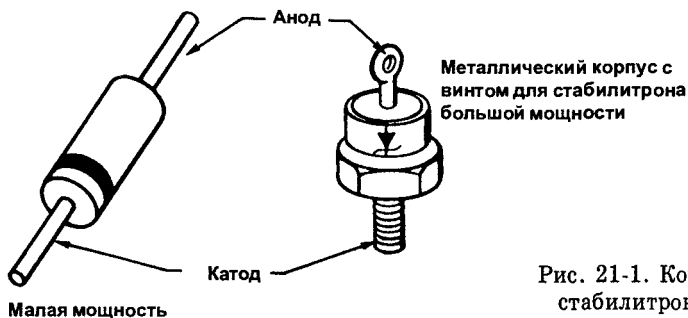


Рис. 21-1. Корпуса стабилитронов.



Рис. 21-2. Схематическое обозначение стабилитрона.

корпусе с винтом. Схематическое обозначение стабилитрона такое же, как и у диода, за исключением диагональных линий у черты катода (рис. 21-2).

21-1. Вопросы

1. Какова уникальная особенность стабилитрона?
2. Как стабилитрон включается в цепь?
3. Что определяет напряжение, при котором стабилитрон испытывает пробой?
4. Что надо учитывать при определении мощности, рассеиваемой стабилитроном?
5. Нарисуйте схематическое обозначение стабилитрона и пометьте его выводы.

21-2. ПАРАМЕТРЫ СТАБИЛИТРОНА

Максимальный ток стабилизации (I_{ZM}) — это максимальный обратный ток, который может течь через стабилитрон без превышения рассеиваемой мощности указанной производителем. Обратный ток (I_R) представляет собой ток утечки перед началом пробоя. Он указывается при некотором обратном напряжении (E_R). Обратное напряжение составляет примерно 80% от напряжения стабилизации (E_z).

Стабилитроны с напряжением стабилизации 5 вольт или более имеют *положительный температурный коэффициент напряжения стабилизации*, который означает, что напряжение стабилизации увеличивается при увеличении температуры. Стабилитроны, имеющие напряжение стабилизации менее 4 вольт, имеют *отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации*, который означает, что напряжение стабилизации уменьшается при увеличении температуры. Стабилитроны, имеющие



напряжение стабилизации между 4 и 5 вольтами, могут иметь как положительный, так и отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации.

Температурно компенсированный стабилитрон образован последовательным соединением стабилитрона и обычного диода, причем диод смещен в прямом направлении, а стабилитрон — в обратном. Тщательно выбирая диоды, можно добиться равенства температурных коэффициентов по величине, по знаку они будут противоположны. Для полной компенсации может понадобиться более одного диода.

21-2. Вопросы

1. Что определяет максимальный ток стабилизации стабилитрона?
2. В чем разница между максимальным током стабилизации и обратным током стабилитрона?
3. Что означает положительный температурный коэффициент напряжения стабилизации?
4. Что означает отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации?
5. Как можно температурно скомпенсировать стабилитрон?

21-3. РЕГУЛИРОВКА НАПРЯЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ СТАБИЛИТРОНОВ

Стабилитрон можно использовать для стабилизации или регулировки напряжения. Например, он может быть использован для компенсации изменений напряжения линии питания или при изменении резистивной нагрузки, питаемой постоянным током.

На рис. 21-3 показана типичная регулирующая цепь со стабилитроном. Стабилитрон соединен последовательно с резистором R_s . Резистор позволяет протекать через стабилитрон такому току, чтобы он работал в режиме пробоя (стабилизации). Входное постоянное напряжение должно

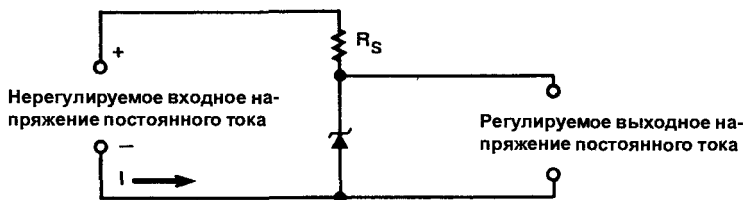


Рис. 21-3. Типичная регулирующая цепь со стабилитроном.

быть выше, чем напряжение стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Стабилитроны выпускают с определенным напряжением пробоя, которое часто называют *напряжением стабилизации* (V_Z). Падение напряжения на резисторе равно разности входного напряжения и напряжения стабилизации.

Входное напряжение может увеличиваться или уменьшаться. Это обуславливает соответствующее увеличение или уменьшение тока через стабилитрон. Когда стабилитрон работает при напряжении стабилизации, или в области пробоя, при увеличении входного напряжения через него может течь большой ток. Однако напряжение на стабилитроне останется таким же. Стабилитрон оказывает противодействие увеличению входного напряжения, так как при увеличении тока его удельное сопротивление падает. Это позволяет выходному напряжению на стабилитроне оставаться постоянным при изменениях входного напряжения. Изменение входного напряжения проявляется только в изменении падения напряжения на последовательно включенном резисторе. Этот резистор включен последовательно со стабилитроном, и сумма падений напряжения на них должна равняться входному напряжению. Выходное напряжение снимается со стабилитрона. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и включенного последовательно с ним резистора.

Описанная цепь выдает постоянное напряжение. При расчете цепи должны учитываться как ток, так и напря-

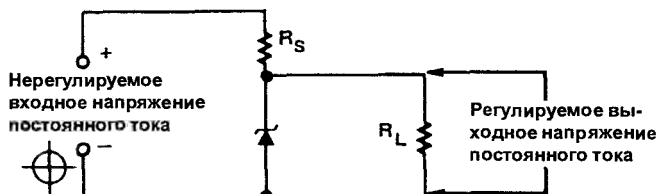


Рис. 21-4. Регулятор напряжения на основе стабилитрона с нагрузкой.

жение. Внешняя нагрузка потребляет ток нагрузки (I_L), который определяется сопротивлением нагрузки и выходным напряжением (рис. 21-4). Через резистор, включенный последовательно со стабилитроном, протекает и ток нагрузки, и ток стабилизации. Этот резистор должен быть выбран таким образом, чтобы через стабилитрон протекал ток стабилизации и он находился в области пробоя.

При увеличении резистивной нагрузки ток нагрузки уменьшается, что должно вызвать увеличение падения напряжения на нагрузке. Но стабилитрон препятствует любому изменению тока. Сумма тока стабилизации и тока нагрузки через последовательно включенный резистор остается постоянной. Это обеспечивает постоянство падения напряжения на последовательно включенном резисторе.

Аналогично, когда ток через нагрузку увеличивается, ток стабилизации уменьшается, обеспечивая постоянство напряжения. Это позволяет цепи оставлять постоянным выходное напряжение при изменениях входного.

21-3. Вопросы

1. В чем практическое назначение стабилитрона?
2. Нарисуйте схему регулирующей цепи со стабилитроном.
3. Как можно изменить выходное напряжение регулирующей цепи со стабилитроном?
4. Что должно учитываться при расчете регулирующей цепи со стабилитроном?



5. Опишите, как регулирующая цепь со стабилитроном поддерживает выходное напряжение постоянным.

21-4. ПРОВЕРКА СТАБИЛИТРОНОВ

Стабилитроны могут быть быстро проверены на разрыв цепи, короткое замыкание или утечку с помощью омметра. Омметр подключается в прямом и обратном направлениях так же, как и при проверке диодов. Однако такая проверка не дает информации о напряжении стабилизации стабилитрона, для его измерения должна быть выполнена регулировочная проверка с помощью блока питания, имеющего приборы для измерения напряжения и тока.

На рис. 21-5 показана установка для регулировочной проверки стабилитрона. Выход источника питания подсоединен через последовательно включенный ограничивающий резистор к проверяемому стабилитрону. К стабилитрону подключен вольтметр для проверки напряжения стабилизации. Выходное напряжение медленно увеличивается до тех пор, пока через стабилитрон не потечет определенный ток. После этого ток изменяется в области изменения тока стабилизации (I_z). Если напряжение остается постоянным, то стабилитрон работает правильно.

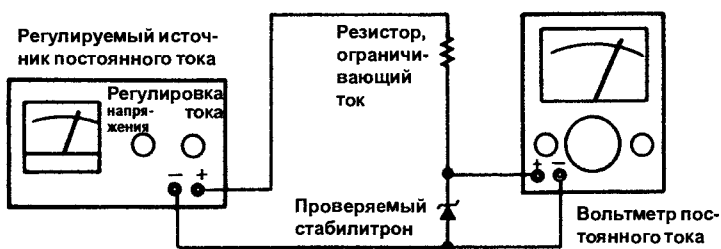


Рис. 21-5. Установка для проверки регулирующих свойств стабилитрона.

21-4. Вопросы

1. Опишите процесс проверки стабилитрона с помощью омметра.



2. Какие параметры нельзя проверить, используя омметр для проверки стабилитрона?
3. Нарисуйте схему, показывающую подключение стабилитрона для проверки напряжения стабилизации.
4. Опишите, как с помощью схемы из вопроса 3 определить, правильно ли работает стабилитрон.
5. Как можно определить катод стабилитрона с помощью омметра?

РЕЗЮМЕ

- Стабилитроны рассчитаны для работы при напряжениях больших, чем напряжение пробоя (максимальное обратное напряжение).
- Напряжение пробоя стабилитрона определяется удельным сопротивлением диода.
- Стабилитроны выпускаются с определенным напряжением стабилизации.
- Мощность, рассеиваемая стабилитроном, зависит от температуры и длины выводов.
- Схематическое обозначение стабилитрона следующее:



- Стабилитроны выпускаются в таких же корпусах, что и диоды.
- Стабилитроны с напряжением стабилизации 5 вольт или более имеют положительный температурный коэффициент напряжения стабилизации.
- Стабилитроны, которые имеют напряжение стабилизации менее 4 вольт, имеют отрицательный температурный коэффициент напряжения стабилизации.
- Стабилитроны используются для стабилизации или регулировки напряжения.
- Регуляторы на основе стабилитронов обеспечивают постоянное выходное напряжение, несмотря на изменения входного напряжения или выходного тока.



- Стабилитроны могут быть проверены на разрыв цепи, короткое замыкание или утечку с помощью омметра.
- Для того чтобы определить, работает ли стабилитрон при заданном напряжении стабилизации, может быть выполнена регулировочная проверка.

Глава 21. САМОПРОВЕРКА

1. Объясните, как работает стабилитрон в цепи регулирования напряжения.
2. Опишите процесс проверки напряжения стабилизации стабилитрона.

Глава 22.

БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать конструкцию транзистора и две его различные конфигурации.
- Нарисовать схематические обозначения n - p - n и p - n - p транзисторов и пометить их выводы.
- Перечислить способы классификации транзисторов.
- Перечислить функции транзистора, используя справочник и условное обозначение.
- Перечислить распространенные корпуса транзисторов.
- Объяснить, как проверить транзистор с помощью омметра и с помощью прибора для проверки транзисторов.
- Описать процесс подбора замены транзистора.

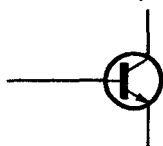
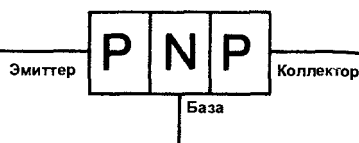
В 1948 году в лабораториях фирмы Bell был изготовлен первый работающий транзистор. Транзистор — это состоящее из трех элементов и двух p - n переходов устройство, используемое для управления электрическим током. Изменяя величину напряжения, приложенного к трем элементам, можно управлять величиной тока через транзистор и использовать его для усиления, генерации или переключения. Этим применениям посвящены главы 26, 27 и 28.

22-1. КОНСТРУКЦИЯ ТРАНЗИСТОРА

Когда к полупроводниковому диоду добавляется третий слой полупроводника, получается устройство, которое может усиливать мощность или напряжение. Это устройство называется **биполярным транзистором** или просто **транзистором**. Далее мы везде будем использовать термин *транзистор*.



Блок-схема п-р-п транзистора

Схематическое обозначение
п-р-п транзистора

Блок-схема р-п-р транзистора

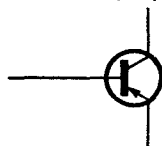
Схематическое обозначение
р-п-р транзистора

Рис. 22-1. п-р-п транзистор.

Рис. 22-2. р-п-р транзистор.

Транзистор, как и диод, может быть изготовлен из германия или кремния, но кремний более популярен. Транзистор состоит из трех областей с чередующимся типом проводимости (по сравнению с двумя у диода). Эти три области могут быть расположены двумя способами.

В первом случае материал р-типа расположен между двумя слоями материала п-типа, образуя п-р-п транзистор (рис. 22-1). Во втором случае слой материала п-типа расположен между двумя слоями материала р-типа, образуя р-п-р транзистор (рис. 22-2).

У транзисторов обоих типов средняя область называется *базой*, а внешние области называются *эмиттером* и *коллектором*.

22-1. Вопросы

1. Чем конструкция транзистора отличается от конструкции диода?
2. Какие существуют два типа транзисторов?
3. Как называются три части транзистора?
4. Нарисуйте схематические обозначения п-р-п и р-п-р транзисторов и обозначьте их выводы.
5. Для чего используются транзисторы?



22-2. ТИПЫ ТРАНЗИСТОРОВ И ИХ КОРПУСА

Транзисторы классифицируются по следующим параметрам:

1. По типу проводимости (n-p-n или p-n-p).
2. По используемому материалу (германий или кремний).
3. По основному назначению (высокой или низкой выходной мощности, переключательные или высокочастотные).

Большинство транзисторов идентифицируются по условному обозначению. Условное обозначение состоит из пяти элементов и содержит информацию об исходном материале транзистора, его назначении, классификации, номере разработки. Эти символы идентифицируют устройство как транзистор и показывают, что он имеет 2 p-n перехода.

Корпуса служат для защиты транзистора и обеспечивают возможность электрического подсоединения к эмиттеру, базе и коллектору. Корпус также служит для отвода тепла или площадью, с которой тепло может излучаться, удаляя избыточное тепло от транзистора и предотвращая возможность теплового повреждения. Существует много различных корпусов, охватывающих широкую область применений (рис. 22-3).

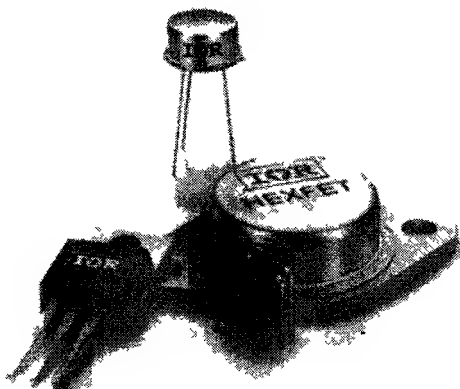


Рис. 22-3. Различные корпуса транзисторов.

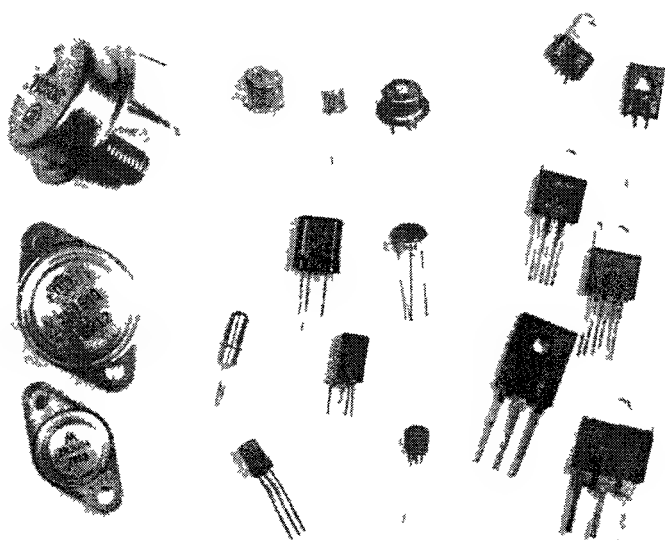


Рис. 22-4. Типичные корпуса транзисторов.

Корпуса транзисторов отличаются размерами и конфигурацией. Некоторые часто встречающиеся корпуса транзисторов показаны на рис. 22-4.

Вследствие большого разнообразия корпусов транзисторов очень трудно предложить общее правило для идентификации выводов эмиттера, базы и коллектора на каждом устройстве. Для этого лучше обратиться к инструкции, предоставляемой производителем, или к справочнику.

22-2. Вопросы

1. Как классифицируются транзисторы?
2. Какие символы используются для классификации транзисторов?
3. Для чего служат корпуса транзисторов?
4. Как обозначаются корпуса транзисторов?
5. Как определить, какой вывод у транзистора является базой, эмиттером или коллектором?



22-3. ОСНОВЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРА

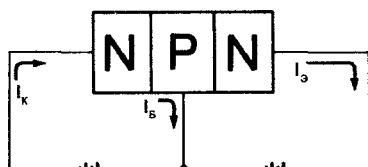
Диод является выпрямителем, а транзистор — усилителем. Транзистор может использоваться различными способами, но основной его функцией является усиление сигналов.

К транзистору должно быть правильно приложено напряжение смещения для того, чтобы области эмиттера, базы и коллектора взаимодействовали должным образом. При правильно приложенном напряжении смещения эмиттерный переход транзистора смещен в прямом направлении, а коллекторный переход — в обратном. Правильно приложенное напряжение смещения на транзистор типа $n-p-n$ показано на рис. 22-5.

Смещение в прямом направлении заставляет электроны течь с эмиттера $n-p-n$ транзистора. Прямое смещение — это положительное напряжение на выводе базы по отношению к эмиттеру. Положительный потенциал базы притягивает электроны, создавая поток электронов из эмиттера. На электроны, притянутые базой, начинает влиять положительный потенциал, приложенный к коллектору. Большинство электронов притягивается к коллектору и к положительному выводу источника тока, создающего обратное смещение. Небольшая часть электронов поглощается областью базы и поддерживает небольшой поток электронов от базы, область базы при этом должна быть предельно тонкой. В правильно смещенном $p-n-p$ транзисторе выводы источников тока необходимо поменять местами (рис. 22-6).

Разница между $n-p-n$ и $p-n-p$ транзисторами двойная: источники тока имеют противоположную полярность, и направление потока электронов меняется на противоположное.

Как и в диоде, в транзисторе существует потенциальный барьер. В транзисторе потенциальный барьер возникает у перехода эмиттер-база. Для того чтобы электроны могли проходить через этот переход, внешнее смещение должно



Блок-схема смещенного n-p-n транзистора

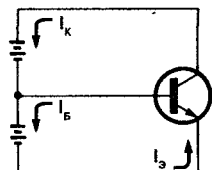
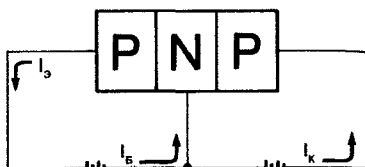


Схема смещенного n-p-n транзистора

Рис. 22-5. Правильно смещенный n-p-n транзистор.



Блок-схема смещенного p-n-p транзистора

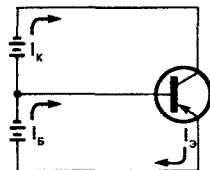


Схема смещенного p-n-p транзистора

Рис. 22-6. Правильно смещенный p-n-p транзистор.

превышать потенциальный барьер. Величина внутреннего потенциального барьера определяется типом используемого полупроводникового материала. Как и в диодах, величина внутреннего потенциального барьера составляет 0,3 вольта для германиевых транзисторов и 0,7 вольта для кремниевых.

К переходу коллектор-база транзистора также должен быть приложен положительный потенциал, достаточно высокий для того, чтобы притягивать большинство электронов, поставляемых эмиттером. Напряжение обратного смещения, приложенное к переходу коллектор-база обычно намного выше, чем напряжение прямого смещения, приложенного к переходу эмиттер-база, снабжающего электронами этот источник более высокого напряжения.

22-3. Вопросы

1. В чем основная функция транзистора?
2. Каков правильный способ подачи смещения на транзистор?
3. В чем разница подачи смещения на n-p-n и на p-n-p транзистор?



4. Чему равна величина потенциального барьера для германиевого и кремниевого транзисторов?
5. Чем отличаются напряжения смещения переходов коллектор-база и эмиттер-база?

22-4. ПРОВЕРКА ТРАНЗИСТОРОВ

Транзисторы — это полупроводниковые устройства, которые обычно работают длительное время без отказа. Если транзистор вышел из строя, то это вызвано или высокой температурой, или большим током, или высоким напряжением. Отказ может быть вызван и высоким механическим давлением. В результате такого электрического или механического воздействия в транзисторе может произойти разрыв цепи или короткое замыкание, или его характеристики могут измениться достаточно сильно, чтобы повлиять на его работу. Существует два метода проверки транзисторов для определения его исправности: с помощью омметра и с помощью прибора для проверки транзисторов.

Стандартный омметр может помочь обнаружить неисправный транзистор методом проверки вне цепи. Для этого проверяется сопротивление между двумя переходами транзистора следующим образом: между эмиттером и базой, между коллектором и базой и между коллектором и эмиттером. При проверке транзистора сопротивление между любыми двумя выводами измеряется при подключении измерительных проводов омметра одним и тем же образом. После этого измерительные провода омметра меняют местами. При одном подключении проводов сопротивление должно быть высоким, 10000 ом или более. При противоположном подключении сопротивление должно быть ниже, менее чем 10000 ом.

Каждый переход транзистора имеет низкое сопротивление, когда он смещен в прямом направлении, и высокое сопротивление, когда он смещен в обратном направлении. Батарея в омметре является источником как прямого, так и обратного смещения. Измеренное сопротивление различно у транзисторов различных типов, но всегда отличается

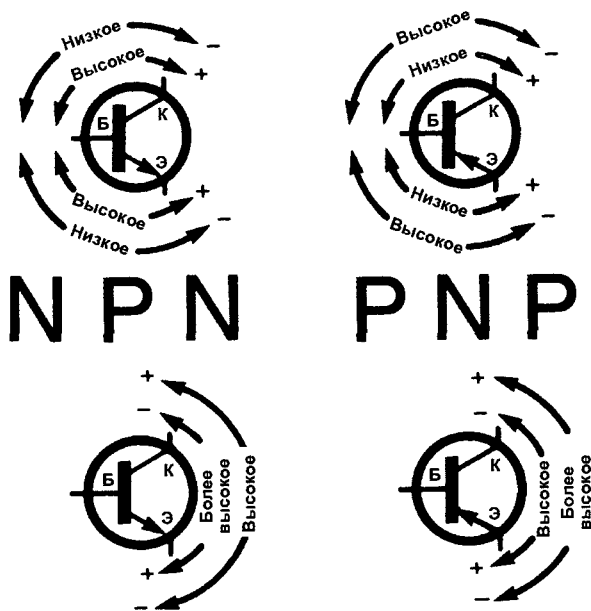


Рис. 22-7. Измерение сопротивлений переходов транзистора.

при перемене выводов омметра. Этот метод проверки пригоден как для транзисторов типа n-p-n, так и для транзисторов типа p-n-p (рис. 22-7).

Если транзистор не проходит эту проверку, то он неисправен, но, тем не менее, может быть неисправным, и если проходит. Более надежным способом проверки транзисторов является использование прибора для проверки транзисторов.

Предостережение: как и в случае диодов, напряжение на выводах омметра не должно превышать максимально допустимое между переходами транзистора. Нижние шкалы некоторых омметров могут допустить ток, который повредит транзистор при проверке. В качестве меры предосторожности лучше начать измерение с безопасной шкалы и только после этого перейти на шкалу, дающую адекватный отсчет.



Приборы для проверки транзисторов специально рассчитаны на проверку транзисторов и диодов. Существуют два типа таких приборов: для проверки в составе цепи и для проверки вне цепи. Оба прибора могут быть размещены в одном корпусе (рис. 22-8).

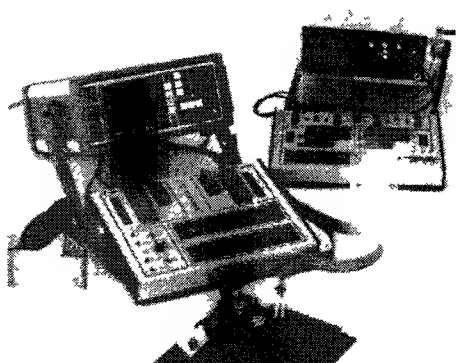


Рис. 22-8. Прибор для проверки транзисторов.

Способность транзисторов усиливать принимается за грубую оценку их работоспособности. Прибор для проверки в составе цепи имеет преимущество, так как транзистор не надо удалять из цепи для проверки. Прибор для проверки вне цепи может не только определить исправность транзистора, но также измерить ток утечки, что нельзя проделать в составе цепи.

Приборы для проверки транзисторов содержат органы управления для установки величины напряжения, тока и сигнала. Для выбора правильных режимов измерения необходимо обратиться к инструкции по эксплуатации прибора.

22-4. Вопросы

1. Что может служить причиной выхода транзистора из строя?
2. Каковы два метода проверки транзисторов?
3. Что должен показывать омметр при проверке n-p-n транзистора?



4. Какие существуют два типа приборов для проверки транзисторов?

22-5. ЗАМЕНА ТРАНЗИСТОРОВ

Чтобы обеспечить возможность замены транзисторов, производители публикуют их параметры. Пользуясь этими данными, можно уверенно проводить замену транзисторов.

Если транзистора нет в списке или его условное обозначение пропущено, для точного выбора замены может быть использована следующая процедура.

1. **p-n-p или p-n-p?** Первым источником информации может быть условное обозначение на схеме. Если схемы нет, нужно определить полярность источника питания между эмиттером и коллектором. Если на коллекторе по отношению к эмиттеру плюс, то это — транзистор p-n-p типа. Если на коллекторе по отношению к эмиттеру минус, то это — транзистор p-n-p типа. Простой способ запомнить полярность напряжения на коллекторе для каждого типа транзистора показан на рис. 22-9.
2. **Германиевый или кремниевый?** Измерьте напряжение между эмиттером и базой. Если это напряжение составляет примерно 0,3 вольта, то транзистор германиевый. Если это напряжение составляет примерно 0,7 вольт, то транзистор кремниевый.
3. **Какова область частот, в которой работает транзистор?** Установите тип цепи и установите, работает ли транзистор в диапазоне звуковых частот, в килогерцовом или в мегагерцовом диапазоне.
4. **Чему равно рабочее напряжение?** Напряжение между коллектором и эмиттером, коллектором и базой и эмит-

NP_{ositive}N
PN_{egative}P

Рис. 22-9. Как запомнить полярность напряжения на коллекторе.



тером и базой может быть определено либо из схемы, либо путем непосредственного измерения. Транзистор, выбранный для замены, должен иметь паспортные значения напряжений, по крайней мере, в три или четыре раза превышающие напряжения, при которых он будет работать. Это поможет защитить транзистор от выбросов напряжения, тока и переходных процессов, имеющих место в большинстве цепей.

5. Какие требования к току коллектора? Простейший способ определения тока коллектора — измерение тока в цепи коллектора с помощью амперметра. Измерение должно быть проведено при максимальной потребляемой мощности. Опять же, в целях безопасности для замены следует подобрать транзистор, паспортное значение тока коллектора которого в три-четыре раза превышает измеренный ток.
6. Какова максимальная рассеиваемая мощность? Для определения максимальной мощности ($P = IE$) используйте максимальное напряжение и максимальное значение тока коллектора. Транзистор является главным фактором при определении рассеиваемой мощности в цепях следующих типов:
 - Входные каскады на звуковых или радиочастотах (от 50 до 200 мВт).
 - Каскады промежуточной частоты или задающие каскады (от 200 мВт до 1 Вт).
 - Мощные выходные каскады (1 Вт и выше).
7. Какое усиление по току? Усиление малого сигнала постоянного тока в схеме с общим эмиттером характеризуется коэффициентом усиления h_{21} или Бета (β) и будет рассмотрено далее. Некоторыми типичными категориями усиления являются:
 - Смесители радиочастоты, усилители промежуточной и звуковой частот (усиление в диапазоне от 80 до 150 кГц)
 - Задающие каскады радио и звуковой частоты (от 25 до 80 кГц)



- Выходные каскады радио и звуковой частоты (от 4 до 40 кГц)
 - Предварительные усилители с высоким усилением (от 150 до 500 кГц)
8. Каков тип корпуса? Часто разница между типами корпуса оригинальной детали и рекомендуемой замены незначительна. На размер и тип корпуса обращают внимание только тогда, когда на плате мало места и требуется точная подгонка. При установке мощных транзисторов необходимо всегда использовать силиконовую смазку для того, чтобы обеспечить отвод тепла.
9. Какая конфигурация выводов? Это не самое главное соображение при замене транзисторов, хотя для облегчения установки транзистора желательно, чтобы конфигурация выводов совпадала.
-

22-5. Вопросы

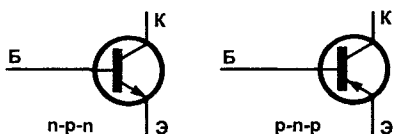
1. Где можно найти советы по замене транзисторов?
2. Почему важно знать, является транзистор германиевым или кремниевым?
3. Почему при замене транзистора важно знать его рабочую частоту, рабочие значения напряжений и токов и рассеиваемую мощность?
4. Что характеризует коэффициент транзистора Бета?
5. Играет ли важную роль при замене транзистора его корпус и конфигурация выводов?

РЕЗЮМЕ

- Транзистор — это устройство, состоящее из трех слоев, и используемое для усиления мощности и напряжения.
- Биполярный транзистор часто называют просто транзистором.
- Транзисторы бывают конфигурации n-p-n или p-n-p.
- Средняя область транзистора называется базой, а две внешние области — эмиттером и коллектором.



- Схематические обозначения n-p-n и p-n-p транзисторов изображены ниже:



- Транзисторы классифицируются по типу проводимости (n-p-n или p-n-p), по материалу (германиевый или кремниевый), по мощности: малой или большой, по способу использования: переключательный или высокочастотный.
- Условные обозначения транзисторов состоят из элементов, содержащих буквы и цифры.
- Корпуса транзисторов обеспечивают защиту, отвод тепла и возможность подключения транзистора к схеме.
- Корпуса транзисторов обозначаются буквами ТО (transistor outline).
- При правильно поданном напряжении смещения переход эмиттер-база транзистора смещен в прямом направлении, а переход коллектор-база — в обратном.
- Источники смещения p-n-p транзистора имеют полярность противоположную полярности источникам смещения n-p-n транзистора.
- Внутренний потенциальный барьер для германиевого транзистора составляет 0,3 вольта, а для кремниевого — 0,7 вольт.
- Напряжение обратного смещения, приложенное к переходу коллектор-база, выше, чем напряжение прямого смещения, приложенное к переходу эмиттер-база.
- При проверке транзистора с помощью омметра каждый переход показывает низкое сопротивление при прямом смещении и высокое сопротивление при обратном смещении.
- Приборы для проверки транзисторов могут проверять транзисторы как в цепи, так и вне цепи.



Глава 22. САМОПРОВЕРКА

1. Переход транзистора может быть смещен в прямом направлении, в обратном направлении или быть несмещенным. Каковы нормальные условия смещения переходов эмиттер-база и коллектор-база в транзисторе?
2. Какое сопротивление должен показывать каждый переход при проверке исправного транзистора с помощью омметра?
3. Какие трудности возникают при определении типа материала и идентификации выводов эмиттера, коллектора и базы неизвестного транзистора при его проверке с помощью омметра?
4. Почему необходимо знать тип проводимости транзистора (n-p-n или p-n-p) при его подключении в цепь?
5. Чем отличается проверка транзистора с помощью омметра от проверки с помощью прибора для проверки транзисторов?

Глава 23. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать разницу между транзисторами, полевыми транзисторами с р-п-переходом и полевыми транзисторами с изолированным затвором (МОП-транзисторами).
- Нарисовать схематические обозначения полевых транзисторов с р-п-переходом и каналом п- и р-типа проводимости, а также полевые транзисторы с изолированным затвором обедненного и обогащенного типа.
- Описать, как работают полевые транзисторы с р-п-переходом и полевые транзисторы с изолированным затвором обедненного и обогащенного типа.
- Перечислить составные части полевых транзисторов с р-п-переходом и полевых транзисторов с изолированным затвором.
- Описать меры предосторожности, которые необходимо соблюдать при работе с полевыми транзисторами с изолированным затвором.
- Описать процедуру проверки полевых транзисторов с р-п-переходом и полевых транзисторов с изолированным затвором с помощью омметра.

История полевых транзисторов начинается с 1925 года, когда Юлиус Лилленфелд изобрел полевой транзистор с р-п-переходом и полевой транзистор с изолированным затвором. Оба этих устройства доминируют в настоящее время в электронной технологии. Эта глава является введением в теорию полевых транзисторов с р-п-переходом и полевых транзисторов с изолированным затвором.

23-1. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С р-п-ПЕРЕХОДОМ

Полевой транзистор с р-п-переходом — это униполярный транзистор, в котором работают только основные носители.



Полевой транзистор с р-п-переходом — это устройство, управляемое напряжением. Полевые транзисторы с р-п-переходом состоят из полупроводниковых материалов п- и р-типа и способны усиливать электронные сигналы, а конструкция отличается от конструкции биполярных транзисторов, и их работа основана на других принципах. Знание конструкции полевых транзисторов с р-п-переходом помогает понять, как они работают.

Конструкция полевых транзисторов с р-п-переходом начинается с подложки, или базы, слабо легированного полупроводникового материала. **Подложка** может быть из материала п- или р-типа. р-п-переход в подложке изготавливается как методом диффузии, так и методом выращивания (см. главу 20). Форма р-п-перехода играет важную роль. На рис. 23-1 показано сечение встроенной области в подложке. U-образная область называется **каналом**, она утоплена по отношению к верхней поверхности подложки. Когда канал сделан из материала п-типа в подложке из материала р-типа образуется полевой транзистор с *каналом п-типа*. Когда канал сделан из материала р-типа в подложке из материала п-типа образуется полевой транзистор с *каналом р-типа*.

Полевой транзистор с р-п-переходом имеет три вывода (рис. 23-2). Один вывод соединен с подложкой и образует **затвор** (З). Выводы, соединенные с концами канала образуют **исток** (И) и **сток** (С). Неважно какой из выводов соединен со стоком, а какой с истоком, так как канал симметричен.

Работа полевых транзисторов с р-п-переходом требует двух внешних источников смещения. Один из источников

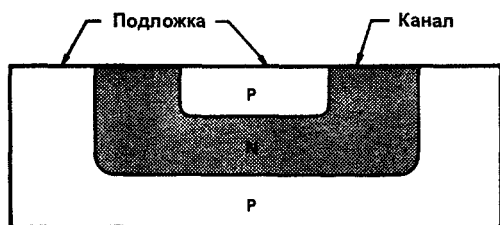


Рис. 23-1. Сечение полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа.

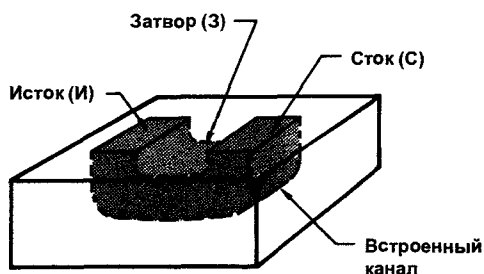


Рис. 23-2. Подсоединение выводов полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа.

($E_{\text{си}}$) подсоединяется между стоком и истоком, заставляя ток течь через канал. Другой источник ($E_{\text{зи}}$) подсоединяется между затвором и истоком. Он управляет величиной тока, протекающего через канал. На рис. 23-3 показан правильно смещенный полевой транзистор с каналом п-типа.

Источник тока $E_{\text{си}}$ подсоединяется таким образом, чтобы на истоке был отрицательный потенциал по отношению к стоку. Это обуславливает ток через канал, так как основными носителями в материале п-типа являются электроны. Ток, текущий от истока к стоку, называется *током стока* полевого транзистора ($I_{\text{с}}$). Канал служит сопротивлением для приложенного напряжения ($E_{\text{си}}$).

Напряжение затвор-исток ($E_{\text{зи}}$) подается таким образом, чтобы затвор имел отрицательный потенциал по отношению к истоку. Это обуславливает формирование обратно смещенного р-п-перехода между затвором и каналом и создает обедненный слой в окрестности р-п-перехода, который распространяется вдоль всей длины канала. Обедненный слой шире у стока, так как напряжение $E_{\text{си}}$ складывается с напряжением $E_{\text{зи}}$, создавая более высокое напряжение обратного смещения, чем у истока.

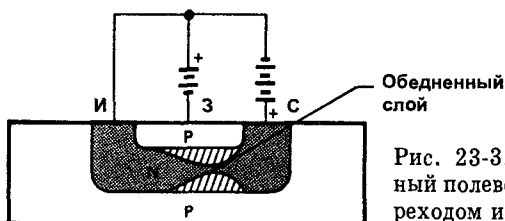


Рис. 23-3. Правильно смещенный полевой транзистор с р-п-переходом и каналом п-типа.



Размером обедненного слоя управляет напряжение $E_{зи}$. При увеличении $E_{зи}$ толщина обедненного слоя увеличивается. При уменьшении толщина обедненного слоя уменьшается. При увеличении толщины обедненного слоя резко уменьшается толщина канала, и, следовательно, уменьшается величина тока, проходящего через него. Таким образом, $E_{зи}$ можно использовать для управления током стока (I_c), который протекает через канал. Увеличение $E_{зи}$ уменьшает I_c .

При обычной работе входное напряжение прикладывается между затвором и истоком. Результирующим выходным током является ток стока (I_c). В полевом транзисторе с р-п-переходом входное напряжение используется для управления выходным током. В обычном транзисторе входной ток, а не напряжение используется для управления выходным током.

Поскольку переход затвор-исток смещен в обратном направлении, полевой транзистор с р-п-переходом имеет очень высокое входное сопротивление. Если переход затвор-исток сместить в прямом направлении, через канал потечет большой ток, что послужит причиной падения входного сопротивления и уменьшения усиления транзистора. Величина напряжения, требуемого для уменьшения I_c до нуля, называется *напряжением отсечки затвор-исток* ($E_{зиотс.}$). Это значение указывается производителем транзистора.

Напряжение сток-исток ($E_{си}$) управляет размером обедненного слоя в полевых транзисторах с р-п-переходом. При увеличении $E_{си}$, увеличивается также I_c . При некотором значении $E_{си}$ величина I_c перестает расти, достигая насыщения при дальнейшем увеличении $E_{си}$. Причиной этого является увеличившийся размер обедненного слоя, и значительное уменьшение в канале неосновных носителей. С увеличением $E_{си}$ увеличивается, с другой стороны, сопротивление канала, что также приводит к меньшей скорости увеличения I_c . Однако рост тока I_c ограничивается вследствие расширения обедненного слоя и уменьшения шири-



ны канала. Когда это имеет место, говорят, что I_C достиг насыщения. Значение $E_{си}$, при котором I_C достигает насыщения, называется *напряжением насыщения* (E_H). Величина E_H обычно указывается производителем при значении $E_{зи}$, равном нулю. При $E_{зи}$, равном нулю, величина E_H близка к $E_{зи\text{ отс}}$. Когда E_H равно $E_{зи}$, ток стока является насыщенным.

Полевые транзисторы с р-каналом и с п-каналом имеют одинаковые характеристики. Основное различие между ними — в направлении тока стока (I_C) через канал. В полевом транзисторе с р-каналом полярность напряжений смещения ($E_{зи}$, $E_{си}$) противоположна полярностям этих напряжений для транзистора с каналом п-типа.

Схематические обозначения для полевых транзисторов с р-каналом и с п-каналом показаны на рис. 23-4. Полярности напряжений смещения для полевого транзистора с п-каналом показаны на рис. 23-5, а для транзистора с р-каналом — на рис. 23-6.

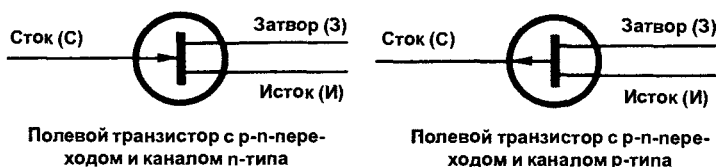


Рис. 23-4. Схематические обозначения полевых транзисторов с р-п-переходом.

Рис. 23-5. Полярности источников тока, необходимые для смещения полевого транзистора с р-п-переходом и каналом п-типа.

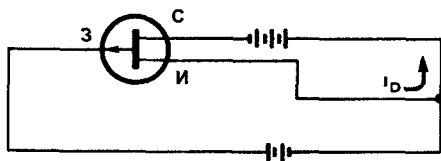
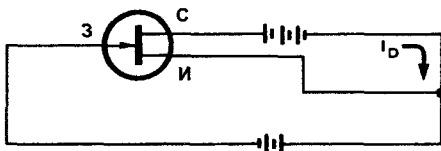


Рис. 23-6. Полярности источников тока, необходимые для смещения полевого транзистора с р-п-переходом и каналом р-типа.



23-1. Вопросы

1. Опишите, чем конструкция полевого транзистора с р-п-переходом отличается от конструкции биполярного транзистора.
2. Назовите три вывода полевого транзистора с р-п-переходом.
3. Как прекратить ток через полевой транзистор с р-п-переходом?
4. Дайте определения следующих терминов для полевого транзистора с р-п-переходом:
 - а. Обедненный слой.
 - б. Напряжение насыщения.
 - в. Исток.
 - г. Сток.
5. Нарисуйте схематические обозначения полевых транзисторов с р-п-переходом с р-каналом и с п-каналом и обозначьте их выводы.

23-2. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ ОБЕДНЕННОГО ТИПА

В полевых транзисторах с изолированным затвором не используют р-п-переход. Вместо него применяется металлический затвор, электрически изолированный от полупроводникового канала тонким слоем окисла. Это устройство известно как **полевой транзистор на основе структуры металл-окисел-полупроводник (МОП транзистор)**.

Существует два типа таких транзисторов: устройства п-типа с п-каналами и устройства р-типа с р-каналами. Устройства п-типа с п-каналами называются **устройствами обедненного типа**, так как они проводят ток при нулевом напряжении на затворе. В устройствах обедненного типа электроны являются носителями тока до тех пор, пока их количество не уменьшится благодаря приложенному к затвору смещению, так как при подаче на затвор отрицательного смещения, ток стока уменьшается. Устройства р-типа с р-каналами называются **устройствами обогащен-**



ного типа. В устройствах обогащенного типа поток электронов обычно отсутствует до тех пор, пока на затвор не подано напряжение смещения. Хотя полевые транзисторы обедненного типа с р-каналом и транзисторы обогащенного типа с п-каналом и существуют, они обычно не используются.

На рис. 23-7 изображено сечение полевого транзистора обедненного типа с п-каналом. Он образован имплантацией п-канала в подложку р-типа. После этого на канал наносится тонкий изолирующий слой двуокиси кремния, оставляющий края канала свободными для подсоединения выводов, стока и истока. После этого на изолирующий слой наносится тонкий металлический слой. Этот металлический слой служит затвором. Дополнительный вывод подсоединяется к подложке. Металлический затвор изолирован от полупроводникового канала, так что затвор и канал не образуют р-п-переход. Металлический затвор используется для управления проводимостью канала так же, как и в полевом транзисторе с р-п-переходом.

На рис. 23-8 изображен полевой транзистор с изолированным затвором и каналом п-типа. Сток всегда имеет положительный потенциал по отношению к истоку, как и в

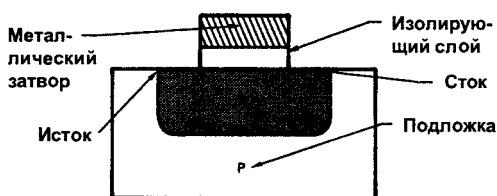
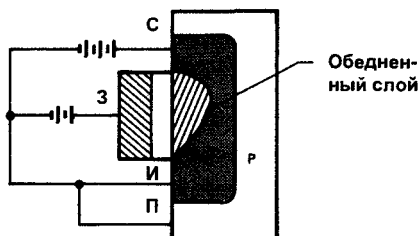


Рис. 23-7. МОП транзистор обедненного типа с п-каналом.

Рис. 23-8. МОП транзистор обедненного типа с п-каналом и приложенным смещением.





полевом транзисторе с р-п-переходом. В канале п-типа основными носителями являются электроны, обеспечивающие ток стока (I_c), протекающий от истока к стоку. Величиной тока стока управляет напряжение смещения ($E_{зи}$), приложенное между затвором и истоком, как и в полевом транзисторе с р-п-переходом. Когда напряжение на истоке равно нулю, через устройство течет заметный ток стока, так как в канале имеется большое количество основных носителей (электронов). Когда на затворе отрицательный потенциал по отношению к истоку, ток стока уменьшается вследствие обеднения основных носителей. Если отрицательный потенциал достаточно велик, то ток стока падает до нуля. Основное различие между полевыми транзисторами с р-п-переходом и полевыми транзисторами с изолированным затвором состоит в том, что на затворе полевого транзистора с изолированным затвором может также быть и положительный потенциал по отношению к истоку. В полевом транзисторе с р-п-переходом нельзя подать такой потенциал на исток, так как в этом случае р-п-переход затвор-канал будет смещен в прямом направлении.

Когда напряжение на затворе полевого МОП-транзистора обедненного типа положительно, изолирующий слой из двуокиси кремния предотвращает какой-либо ток через затвор. Входное сопротивление остается высоким, и в канале появляется больше носителей (электронов), что увеличивает его проводимость. Положительное напряжение на затворе может быть использовано для увеличения тока стока МОП транзистора, а отрицательное напряжение на затворе может быть использовано для уменьшения тока стока. Поскольку отрицательное напряжение подается на затвор для обеднения п-канала МОП транзистора, он называется устройством обедненного режима. Когда напряжение на затворе равно нулю, через МОП транзистор течет большой ток стока. Все устройства обедненного типа обычно открываются при напряжении на затворе, равном нулю.

Схематическое обозначение МОП транзистора обедненного типа с п-каналом показано на рис. 23-9. Заметим, что



вывод затвора отделен от выводов стока и истока. Стрелка, направленная к подложке, указывает, что этот транзистор имеет канал n-типа. В некоторых МОП транзисторах подложка соединена внутри транзистора с истоком, и они не имеют отдельного вывода подложки.

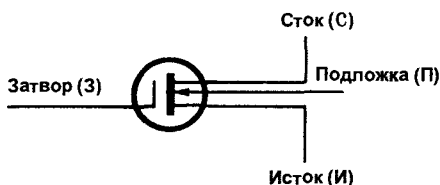


Рис. 23-9. Схематическое обозначение МОП транзистора обедненного типа с n-каналом.

МОП транзистор обедненного типа с n-каналом и правильно поданным напряжением смещения изображен на рис. 23-10. Заметим, что он смещен точно так же, как и полевой транзистор с р-п-переходом и каналом n-типа. Напряжение сток-исток ($E_{си}$) должно всегда прикладываться таким образом, чтобы сток имел положительный потенциал по отношению к истоку. Напряжение затвор-исток ($E_{зи}$) должно иметь обратную полярность. Подложка обычно соединяется с истоком либо внутри транзистора, либо снаружи. В специальных случаях подложка может быть соединена с затвором или с другой точкой цепи.

МОП транзистор обедненного типа может быть изготовлен с каналом р-типа. Транзисторы с р-каналом работают точно так же, как и транзисторы с n-каналом. Разница только в том, что основными носителями являются дырки. Вывод стока имеет отрицательный потенциал по отношению к истоку, и ток стока течет в противоположном направлении.

Потенциал затвора может быть как положительным, так и отрицательным по отношению к истоку.

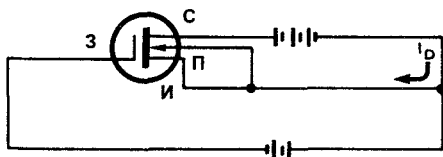


Рис. 23-10. Правильно смещенный МОП транзистор обедненного типа с n-каналом.



На рис. 23-11 показано схематическое обозначение МОП транзистора обедненного типа с р-каналом. Отличие от обозначения МОП транзистора с п-каналом состоит в том, что стрелка направлена от подложки.

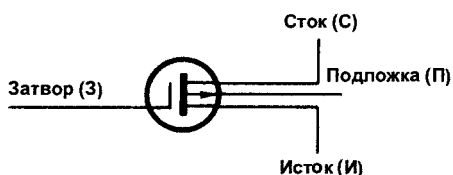


Рис. 23-11. Схематическое обозначение МОП транзистора обедненного типа с р-каналом.

МОП транзисторы обедненного типа как с п-каналом, так и с р-каналом являются симметричными. Выводы стока и истока можно менять местами. В специальных случаях затвор может быть смещен от области стока для того, чтобы уменьшить емкость между затвором и стоком. В случае, когда затвор смещен, выводы стока и истока нельзя менять местами.

23-2. Вопросы

1. Чем отличается конструкция МОП транзистора от конструкции полевого транзистора с р-п-переходом?
2. Опишите, как полевой МОП транзистор проводит ток.
3. В чем главное отличие работы МОП транзистора от работы полевого транзистора с р-п-переходом?
4. Нарисуйте схематические обозначения МОП транзисторов с п-каналом и с р-каналом и обозначьте их выводы.
5. Какие выводы можно менять местами в МОП транзисторе и в полевом транзисторе с р-п-переходом?

23-3. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ С ИЗОЛИРОВАННЫМ ЗАТВОРОМ (МОП ТРАНЗИСТОРЫ) ОБОГАЩЕННОГО ТИПА

МОП транзисторы обедненного типа являются открытыми в нормальном состоянии. Это означает, что они имеют заметный ток стока при напряжении затвор-исток рав-



ном нулю. Это полезно во многих приложениях. Но также полезно иметь устройство, которое в нормальном состоянии закрыто; то есть устройство, проводящее ток только тогда, когда приложено напряжение $E_{зи}$ соответствующей величины. На рис. 23-12 изображен МОП транзистор, работающий как устройство, закрытое в нормальном состоянии. Он подобен МОП транзистору обедненного типа, но не имеет проводящего канала. Вместо этого в подложку внедрены отдельные области стока и истока. На рисунке показана подложка n-типа и области стока и истока p-типа. Может быть также использована и обратная конфигурация. Расположение выводов такое же, как и у МОП транзистора обедненного типа.

МОП транзистор с p-каналом обогащенного типа должен быть смещен таким образом, чтобы на стоке был отрицательный потенциал по отношению к истоку. Когда к транзистору приложено только напряжение сток-исток ($E_{си}$), ток стока отсутствует. Это обусловлено отсутствием проводящего канала между истоком и стоком. Когда на затвор подается отрицательный потенциал по отношению к истоку, дырки направляются к затвору, где они создают канал p-типа, позволяющий протекать току от стока к истоку. При увеличении отрицательного напряжения на затворе размер канала увеличивается, что позволяет увеличиться и току стока. Увеличение напряжения на затворе позволяет увеличить ток стока.

Потенциал затвора МОП транзистора с p-каналом обогащенного типа может быть сделан положительным по отношению к истоку, и это не повлияет на работу транзистора. Ток стока в нормальном состоянии равен нулю и не

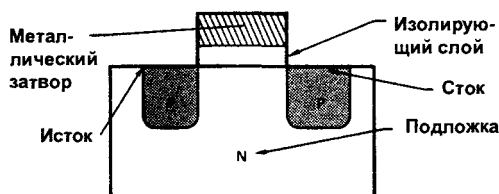


Рис. 23-12. МОП транзистор обогащенного типа с p-каналом.



может быть уменьшен подачей положительного потенциала на затвор.

Схематическое обозначение МОП транзистора с р-каналом обогащенного типа показано на рис. 23-13. Оно аналогично обозначению МОП транзистора с р-каналом обедненного типа, за исключением того, что области истока, стока и подложки разделены пунктирной линией. Это показывает, что транзистор в нормальном состоянии закрыт. Стрелка, направленная от подложки, обозначает канал р-типа.

МОП транзистор с р-каналом обогащенного типа с правильно поданным напряжением смещения показан на рис. 23-14. Заметим, что $E_{\text{си}}$ делает сток МОП транзистора отрицательным по отношению к истоку. $E_{\text{зи}}$ также делает затвор отрицательным по отношению к истоку. При увеличении $E_{\text{зи}}$ и подаче на затвор отрицательного потенциала, появляется заметный ток стока. Подложка обычно соединяется с истоком, но в отдельных случаях подложка и исток могут иметь различные потенциалы.

МОП транзисторы могут быть изготовлены с п-каналом обогащенного типа. Эти устройства работают с положительным напряжением на затворе так, что электроны притягиваются по направлению к затвору и образуют канал п-типа. В остальном они работают так же, как и устройства с каналом р-типа.

Схематическое обозначение МОП транзистора с п-каналом обогащенного типа показано на рис. 23-15. Оно ана-

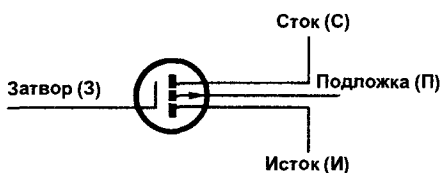
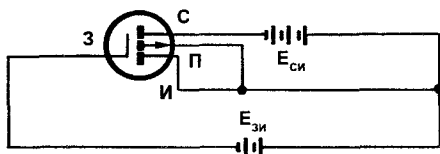


Рис. 23-13. Схематическое обозначение МОП транзистора обогащенного типа с р-каналом.

Рис. 23-14. Правильно смещенный МОП транзистор обогащенного типа с р-каналом.





логично обозначению устройства с р-каналом за исключением того, что стрелка направлена к подложке, обозначая канал п-типа. Правильно смещенный МОП транзистор с п-каналом обогащенного типа показан на рис. 23-16.

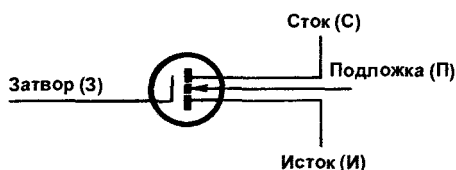
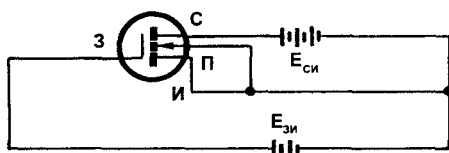


Рис. 23-15. Схематическое обозначение МОП транзистора обогащенного типа с п-каналом.

Рис. 23-16. Правильно смещенный МОП транзистор обогащенного типа с п-каналом.



МОП транзисторы с изолированным затвором обычно симметричны, как и полевые транзисторы с р-п-переходом. Следовательно, сток и исток можно поменять местами.

23-3. Вопросы

1. Чем МОП транзисторы обедненного и обогащенного типа отличаются друг от друга?
2. Опишите, как работает МОП транзистор с изолированным затвором обогащенного типа?
3. Нарисуйте схематические обозначения МОП транзисторов обогащенного типа с р-каналом и с п-каналом и обозначьте их выводы?
4. Почему МОП транзистор с изолированным затвором имеет четыре вывода?
5. Какие выводы МОП транзисторов обогащенного типа можно поменять местами?

23-4. МЕРЫ ПРЕДОСТОРОЖНОСТИ ПРИ РАБОТЕ С МОП ТРАНЗИСТОРАМИ

При работе с МОП транзисторами необходимо соблюдать некоторые меры предосторожности. Важно проверить по



данным производителя максимальное значение $E_{зи}$. Если $E_{зи}$ будет слишком большим, то тонкий изолирующий слой разрушится, и транзистор выйдет из строя. Изолирующий слой достаточно чувствителен и может быть поврежден статическим зарядом, появляющимся на выводах транзистора. Электростатические заряды с пальцев могут перейти на выводы МОП транзистора, когда вы касаетесь его руками или при монтаже.

Для того чтобы избежать повреждения, МОП транзисторы обычно поставляются с соединенными вместе выводами. Закорачивание осуществляется следующими методами: соединение выводов проволокой, упаковка транзистора в закорачивающее кольцо, прессовка транзистора в проводящую пену, соединение нескольких транзисторов вместе, транспортировка в антистатических трубках и заворачивание транзисторов в металлическую фольгу.

Новейшие МОП транзисторы защищены с помощью стабилитронов, включенных внутри транзистора между затвором и истоком. Диоды защищают от статических разрядов и переходных процессов и избавляют от необходимости использования внешних закорачивающих устройств. В электронике переходным процессом называется временное изменение тока, вызванное резким изменением нагрузки, включением или выключением источника тока или импульсным сигналом.

С незащищенными МОП транзисторами можно без опаски работать при соблюдении следующих процедур:

1. До установки в цепь выводы транзистора должны быть соединены вместе.
2. Рука, которой вы будете брать транзистор, должна быть заземлена с помощью металлического браслета на запястье.
3. Жало паяльника следует заземлить.
4. МОП транзистор никогда не должен вставляться в цепь или удаляться из цепи при включенном питании.



23-4. Вопросы

1. По какой причине с МОП транзисторами надо обращаться очень осторожно?
2. Превышение какого напряжения может вывести МОП транзистор из строя?
3. Какие методы используются для защиты МОП транзисторов при транспортировке?
4. Какие меры предосторожности предприняты для защиты новейших МОП транзисторов?
5. Опишите процедуры, которые должны соблюдаться при работе с незащищенными МОП транзисторами.

23-5. ПРОВЕРКА ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

Проверка полевых транзисторов более сложна, чем проверка обычных транзисторов. Перед проверкой полевого транзистора необходимо рассмотреть следующие вопросы:

1. Является устройство полевым транзистором с р-п-переходом или полевым МОП транзистором?
2. Является полевой транзистор устройством с каналом п-типа или устройством с каналом р-типа?
3. Если это МОП транзистор, то какого он типа — обедненного или обогащенного?

Перед удалением полевого транзистора из цепи или началом работы с ним проверьте — является он полевым транзистором с р-п-переходом или полевым МОП транзистором. МОП транзистор можно легко повредить, если не соблюдать следующие меры предосторожности.

1. Закоротите все выводы МОП транзистора до тех пор, пока он не будет готов к работе.
2. Убедитесь в том, что рука, используемая для работы с МОП транзистором, заземлена.
3. Выключите питание цепи перед удалением или установкой МОП транзистора.

Как полевые транзисторы с р-п-переходом, так и МОП транзисторы могут быть легко проверены с помощью прибора для проверки транзисторов или с помощью омметра.



При использовании прибора для проверки транзисторов следуйте руководству по его эксплуатации.

*Проверка полевых транзисторов с р-п-переходом
при помощи омметра*

1. Используйте низковольтный омметр на пределе $R \times 100$.
2. Определите полярность выводов прибора. Белый — положительный, а черный — отрицательный.
3. Определите прямое сопротивление следующим образом:
 - а. Полевой транзистор с каналом п-типа: соедините положительный вывод с затвором, а отрицательный вывод с истоком или стоком. Поскольку и исток, и сток соединены с каналом, необходимо проверить только одну сторону. Прямое сопротивление должно быть низким.
 - б. Полевой транзистор с каналом р-типа: соедините отрицательный вывод с затвором, а положительный с истоком или стоком.
4. Определите обратное сопротивление следующим образом:
 - а. Полевой транзистор с каналом п-типа: соедините отрицательный вывод омметра с затвором, а положительный вывод с истоком или стоком. Полевой транзистор должен иметь бесконечное сопротивление. Низкое сопротивление указывает на короткое замыкание или наличие тока утечки.
 - б. Полевой транзистор с каналом р-типа: соедините положительный вывод с затвором, а отрицательный с истоком или стоком.

Проверка МОП транзисторов с помощью омметра

Прямое и обратное сопротивление можно проверить с помощью низковольтного омметра на его высшем пределе. МОП транзисторы имеют очень высокое входное сопротивление из-за наличия изолированного затвора. Прибор должен показать бесконечное сопротивление и в прямом и в обратном направлениях между затвором и истоком или



стоком. Низкое значение сопротивления указывает на пробой изоляции между затвором и истоком или стоком.

23-5. Вопросы

1. На какие вопросы надо ответить перед проверкой полевых транзисторов?
2. Почему важно знать тип устройства (транзистор с р-п-переходом или МОП транзистор) перед удалением его из цепи?
3. Опишите, как проверить полевой транзистор с р-п-переходом с помощью омметра?
4. Опишите, как проверить МОП транзистор с помощью омметра?
5. Как проверить полевой транзистор с р-п-переходом или МОП транзистор с помощью прибора для проверки транзисторов?

РЕЗЮМЕ

- Полевой транзистор с р-п-переходом использует для управления сигналом канал вместо р-п-переходов (в обычных транзисторах).
- Три вывода полевого транзистора с р-п-переходом подсоединены к затвору, истоку и стоку.
- Входной сигнал прикладывается между затвором и истоком для того, чтобы полевой транзистор с р-п-переходом мог управлять его величиной.
- Полевые транзисторы с р-п-переходом имеют очень высокое входное сопротивление.
- Схематические обозначения полевых транзисторов с р-п-переходом следующие:





- В МОП транзисторах (полевых транзисторах с изолированным затвором) затвор изолирован от канала тонким слоем окисла.
- МОП транзисторы обедненного типа обычно бывают с каналом п-типа и открыты в нормальном состоянии.
- МОП транзисторы обогащенного типа обычно бывают с каналом р-типа и закрыты в нормальном состоянии.
- Главное отличие между полевыми транзисторами с р-п-переходом и МОП транзисторами в том, что потенциал затвора в МОП транзисторах может быть как положительным, так и отрицательным по отношению к истоку.
- Схематическое обозначение для МОП транзистора обедненного типа следующее:



- У большинства полевых транзисторов с р-п-переходом и МОП транзисторов выводы истока и стока можно поменять местами, так как эти устройства являются симметричными.
- Схематическое обозначение для МОП транзистора обогащенного типа следующее:



- С МОП транзисторами следует обращаться осторожно, для избежания повреждения тонкого слоя окисла, отделяющего металлический затвор от канала.
- Электростатические заряды с пальцев могут повредить МОП транзистор.
- До использования выводы МОП транзистора должны быть соединены вместе.
- При работе с МОП транзисторами необходимо использовать металлический браслет на запястье, соединенный проволокой с землей.



- При пайке МОП транзисторов используйте заземленный паяльник и убедитесь в том, что питание цепи выключено.
- Как полевые транзисторы с р-п-переходом, так и МОП транзисторы могут быть проверены с помощью прибора для проверки транзисторов или с помощью омметра.

Глава 23. САМОПРОВЕРКА

1. Объясните, что означает напряжение отсечки полевого транзистора.
2. Как определить напряжение отсечки полевого транзистора с р-п-переходом?
3. Объясните, что такое МОП транзистор обедненного типа.
4. В каком режиме работы МОП транзистор обогащенного типа, вероятно, будет закрыт?
5. Напишите список мер предосторожности, которые должны соблюдаться при работе с МОП транзисторами.

Глава 24. ТИРИСТОРЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить типы тиристоров.
- Описать, как работают в цепи кремниевый управляемый вентиль (КУВ), двунаправленный триодный тиристор (ТРИАК) и двунаправленный диодный тиристор (ДИАК).
- Перечислить цепи, в которых применяются различные типы тиристоров.
- Перечислить корпуса, используемые для тиристоров различных типов.
- Проверить тиристоры с помощью омметра.

Тиристоры — это обширный класс полупроводниковых приборов, используемых для электронного переключения. Они являются полупроводниковыми устройствами с двумя устойчивыми состояниями, имеющие три или более переходов. Тиристоры охвачены внутренней *положительной обратной связью*, позволяющей получить увеличение амплитуды выходного сигнала путем подачи части выходного напряжения на вход.

Тиристоры широко используются для регулирования мощностью постоянного и переменного тока. Они используются для включения и выключения мощности, подаваемой в нагрузку, а также для регулирования величиной этой мощности, например для управления освещенностью или скоростью вращения двигателя.

24-1. КРЕМНИЕВЫЕ УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЕНТИЛИ

Кремниевые управляемые вентили являются хорошо известным типом тиристоров и обычно называются КУВ. Они имеют три вывода (анод, катод и управляющий электрод) и используются, главным образом, как переключа-



тели. КУВ по существу являются выпрямителями, так как они управляют током только в одном направлении. Преимущество КУВ перед мощными транзисторами в том, что они могут управлять большими токами во внешней цепи с помощью небольшого управляющего сигнала. КУВ пропускает ток после прекращения действия управляющего сигнала. Если величина тока падает до нуля, КУВ закрывается, и необходимо подать новый управляющий сигнал для возвращения его в открытое состояние. Мощному транзистору требуется для управления током такой же величины управляющий сигнал в десять раз больший, чем необходим КУВ.

КУВ — это твердотельное устройство, изготовленное из кремния диффузионным или диффузионно-сплавным методом (см. главу 20) и состоящее из четырех полупроводниковых слоев п-типа и р-типа, расположенных поочередно. На рис. 24-1 показана упрощенная схема КУВ. Четыре слоя прилегают друг к другу, образуя три р-п-перехода. Выводы подсоединены только к трем слоям и образуют анод, катод и управляющий электрод.

На рис. 24-2 показаны четыре слоя, разделенные на два трехслойных устройства. Это транзисторы типа р-п-р и п-р-п, соединенные между собой так, чтобы образовать пару с положительной обратной связью. На рис. 24-3 показано схематическое изображение этих транзисторов: анод должен

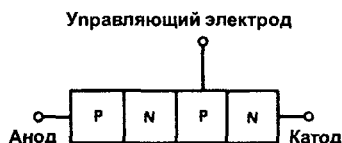


Рис. 24-1. Упрощенная схема КУВ.

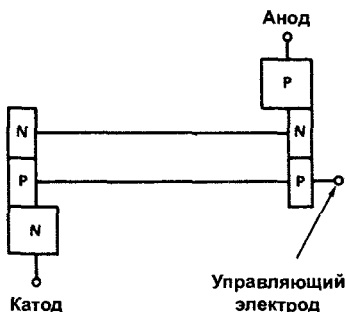


Рис. 24-2. Эквивалентная схема КУВ.

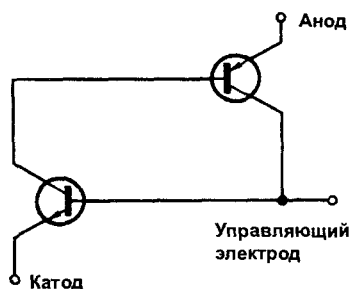


Рис. 24-3. Схематическое представление эквивалентной схемы КУВ.

иметь положительный потенциал по отношению к катоду, а управляющий электрод — оставаться свободным. n - p - n транзистор не пропускает ток, поскольку на его эмиттерный переход не подано напряжение прямого смещения (обеспечиваемое коллектором p - n - p транзистора или управляющим сигналом). А поскольку n - p - n транзистор не пропускает ток, p - n - p транзистор также заперт (так как коллектор p - n - p транзистора обеспечивает смещение на базе p - n - p транзистора). При этих условиях ток не течет от катода к аноду.

Если на управляющий электрод подать положительное напряжение по отношению к катоду, эмиттерный переход n - p - n транзистора будет смещен в прямом направлении, и n - p - n транзистор откроется, потечет ток базы p - n - p транзистора и откроет его. Коллекторный ток p - n - p транзистора является током базы n - p - n транзистора. Оба транзистора будут поддерживать друг друга в проводящем состоянии, позволяя току течь непрерывно от катода к аноду. Процесс будет происходить даже в том случае, если управляющее напряжение приложено на короткий момент времени. Кратковременная подача управляющего напряжения переключает цепь в проводящее состояние, и она продолжает работать при отключенном управляющем напряжении. Ток анода ограничен только внешней цепью. Для переключения КУВ в непроводящее состояние необходимо уменьшить напряжение анод-катод до нуля. Это обеспечит запирающие обоих транзисторов, и они останутся запертыми до тех пор, пока опять не будет подано управляющее напряжение.



КУВ включается положительным управляющим напряжением и выключается уменьшением напряжения анод-катод до нуля. Когда КУВ включен и проводит ток от катода к аноду, его проводимость в прямом направлении достаточно велика. Если изменить полярность напряжения катод-анод, через цепь, проводимость которой резко уменьшится, будет течь только маленький ток утечки.



Рис. 24-4. Схематическое обозначение КУВ.

На рис. 24-4 показано схематическое обозначение КУВ. Оно представляет собой обозначение диода, к которому подсоединен управляющий электрод. Выводы обычно обозначаются буквами К (катод), А (анод) и У (управляющий электрод). На рис. 24-5 показаны несколько корпусов КУВ.

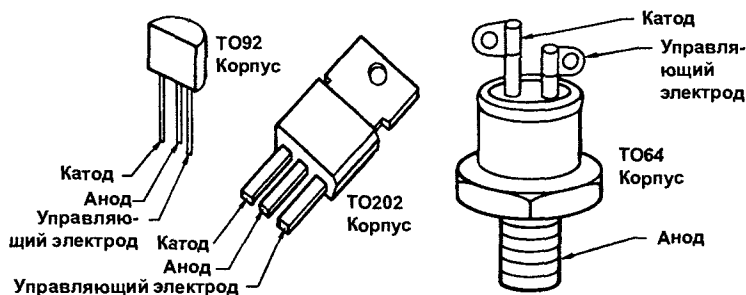


Рис. 24-5. Наиболее распространенные корпуса КУВ.

Правильно смещенный КУВ показан на рис. 24-6. Переключатель используется для подачи и снятия управляющего напряжения. Резистор R_g используется для ограничения тока управляющего электрода. Напряжение между анодом и катодом обеспечивается источником переменного напряжения. Последовательно включенный резистор (R_L) используется для ограничения тока анод-катод во включенном состоянии. Без резистора R_L через КУВ может течь слишком большой ток, способный повредить его.

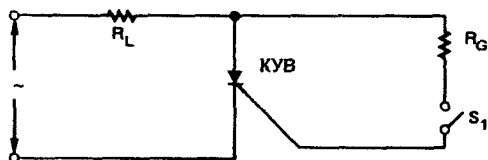


Рис. 24-6. Правильно смещенный КУВ.

КУВ используются, главным образом, для управления подачей мощности постоянного и переменного тока на различные типы нагрузок, а также в качестве переключателей для включения и выключения цепей. Они также могут быть использованы для плавной регулировки мощности, подаваемой на нагрузку. При использовании КУВ, малый ток управляющего электрода может управлять большим током нагрузки.

Когда КУВ используется в цепи постоянного тока, не существует простого метода его выключения без снятия напряжения с нагрузки. Эту проблему можно решить путем подсоединения выключателя параллельно КУВ (рис. 24-7). Когда переключатель S_2 включен, он закорачивает КУВ. Это уменьшает напряжение между анодом и катодом до нуля, прямой ток падает, и КУВ выключается.

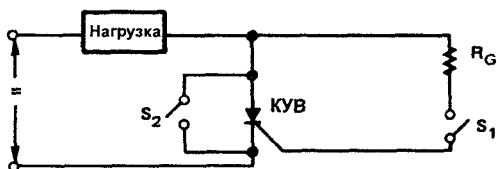


Рис. 24-7. Выключение питания в цепи постоянного тока.

Когда КУВ используется в цепи переменного тока, он проводит ток только в течение половины каждого периода переменного тока, когда потенциал анода положителен по отношению к катоду. Когда управляющий ток приложен к электроду постоянно, КУВ проводит постоянно. Если управляющий ток электрода отсутствует в течение половины периода, КУВ выключается и остается выключенным до тех пор, пока на управляющий электрод ток не будет подан снова. Необходимо отметить, что при этом на нагрузку подается только половина мощности. КУВ можно ис-



пользовать для управления током в течение обоих полупериодов каждого цикла, если выпрямить переменный управляющий ток перед подачей на КУВ.

На рис. 24-8 показана простая однополупериодная регулирующая цепь. Цепь обеспечивает фазовый сдвиг напряжения, подаваемого на анод, на угол от нуля до 90 градусов. Диод D_1 блокирует подачу на управляющий электрод напряжения обратной полярности в течение отрицательного полупериода напряжения, приложенного к аноду.

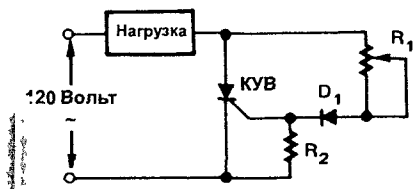


Рис. 24-8. Однополупериодная цепь управления.

24-1. Вопросы

1. Почему для переключения лучше использовать КУВ, чем транзистор?
2. Опишите, как устроен КУВ.
3. Объясните, как работает КУВ.
4. Нарисуйте схематическое обозначение КУВ и обозначьте его электроды.
5. Для чего применяется КУВ?

24-2. ТРИАКИ

Триак — это двунаправленный триодный тиристор¹. Триаки имеют такие же переключательные характеристики как и КУВ, но проводят переменный ток в обоих направлениях. Триак эквивалентен двум КУВ, включенным встречно-параллельно (рис. 24-9).

Так как триак может управлять током, текущим в любом направлении, он широко используется для управления подачей переменного тока на различные типы нагрузок.

¹ В отечественной литературе можно встретить и другое название — симметричный триодный тиристор (*прим. ред.*)

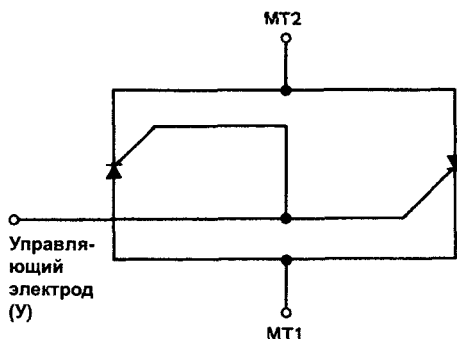
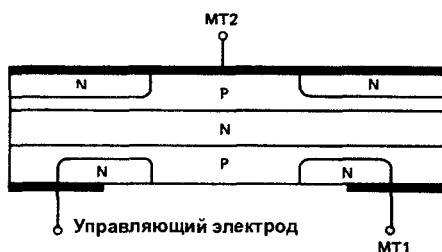


Рис. 24-9. Эквивалентная схема триака.

Рис. 24-10. Упрощенная схема конструкции триака.



Триак включается подачей тока на управляющий электрод и выключается уменьшением рабочего тока до величины, меньшей уровня удержания его в проводящем состоянии, рассчитан на пропускание прямого и обратного тока.

На рис. 24-10 показана упрощенная схема триака. Триак является четырехслойным устройством типа n-p-n-p, соединенным параллельно с устройством типа p-n-p-n, и рассчитанным на управление током, текущим через управляющий электрод. Выводы входа и выхода обозначаются MT1 и MT2. Эти выводы соединены с p-n-переходами на противоположных концах устройства. Вывод MT1 представляет собой опорную точку, относительно которой измеряется напряжение и ток на управляющем электроде. Управляющий электрод (У) соединен с p-n-переходом на том же конце устройства, что и MT1. От вывода MT1 до вывода

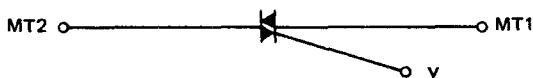


Рис. 24-11. Схематическое обозначение триака.



MT2 сигнал должен пройти через последовательность слоев п-р-п-р или р-п-р-п.

Схематическое обозначение триака показано на рис. 24-11. Устройство состоит из двух диодов, включенных встречно-параллельно, и управляющего электрода. Выводы имеют обозначения MT1, MT2 и У (управляющий электрод). Некоторые корпуса триаков показаны на рис. 24-12.

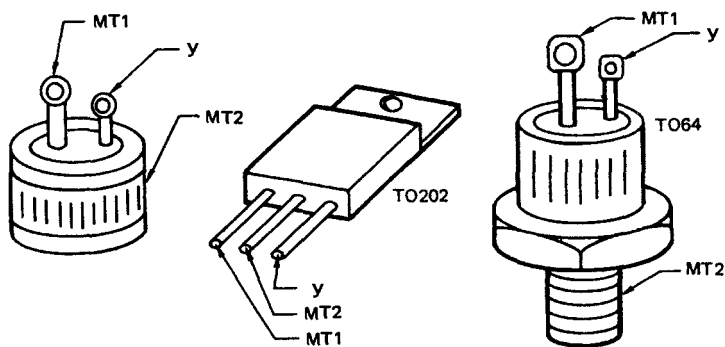


Рис. 24-12. Наиболее распространенные типы корпусов триаков.

Триак может быть использован в качестве переключателя переменного тока (рис. 24-13) или для управления величиной мощности переменного тока, подаваемой в нагрузку (рис. 24-14). Триаки передают в нагрузку полную мощность. При использовании триака для регулировки величины мощности, подаваемой в нагрузку, необходимо специальное запускающее устройство для обеспечения его работы

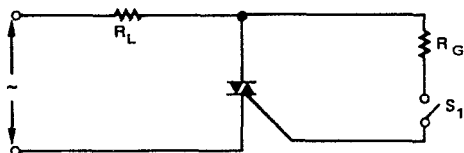
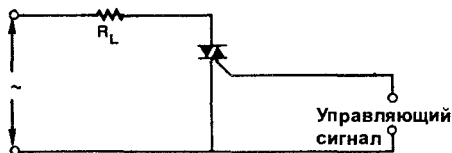


Рис. 24-13. Переключатель переменного тока на основе триака.

Рис. 24-14. Цепь управления переменным током на основе триака.





в течение заданного промежутка времени. Запускающее устройство необходимо потому, что триак имеет не одинаковую чувствительность к токам управляющего электрода, текущим в противоположных направлениях.

Триаки обладают недостатками по сравнению с КУВ: они способны управлять токами не более 25 ампер, тогда как КУВ могут управлять токами до 1400 ампер. Максимально допустимое напряжение для триаков — 500 вольт, а для КУВ — 2600 вольт. Триаки рассчитаны на работу при низких частотах (от 50 до 400 герц), тогда как КУВ могут работать на частотах до 30000 герц. Триаки также имеют трудности при переключении мощности на индуктивной нагрузке.

24-2. Вопросы

1. Чем отличается триак от КУВ?
2. Опишите конструкцию триака.
3. Нарисуйте схематическое обозначение триака и обозначьте его выводы.
4. Где применяется триак?
5. Сравните преимущества и недостатки триаков и КУВ.

24-3. ДВУНАПРАВЛЕННЫЕ ДИОДНЫЕ ТИРИСТОРЫ

Двунаправленные симметричные диодные тиристоры (или двунаправленные запускающие диоды) используются в цепях с триаками, так как триаки имеют несимметричные запускающие характеристики, то есть, они имеют не одинаковую чувствительность к токам управляющего электрода, текущим в противоположных направлениях. **Диак** наиболее часто используется в качестве запускающего устройства.

Диак сконструирован так же, как и транзистор. Он имеет три слоя с чередующимися типами проводимости (рис. 24-15). Разница в конструкции состоит в том, что концентрация легирующих примесей у обоих переходов диака одинакова. Выводы подсоединены только к внешним

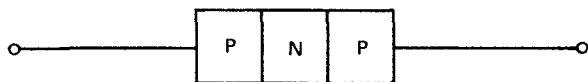
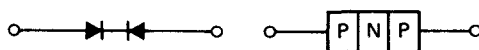


Рис. 24-15. Упрощенная схема диака.

слоям. Поскольку диак имеет только два вывода, они выпускаются в таких же корпусах, что и диоды.

Поскольку оба перехода легированы одинаково, диак влияет на ток, независимо от его направления. Один переход смещается в прямом направлении, а другой — в обратном. Обратно смещенный переход управляет током, текущим через диак. Работа диака аналогична работе двух диодов, включенных встречно-последовательно (рис. 24-16). Диак остается закрытым до тех пор, пока приложенное в любом направлении напряжение не станет достаточным для того, чтобы пробить обратно смещенный переход. Это напряжение называется напряжением включения, и при этом напряжении диак включается и начинает проводить ток, который повышается до значения, ограниченного последовательно включенным резистором.



Может быть установлен в любом направлении

Рис. 24-16. Эквивалентная схема диака.

Схематическое обозначение диака показано на рис. 24-17. Оно аналогично обозначению триака. Разница лишь в том, что диак не имеет управляющего электрода.



Рис. 24-17. Схематическое обозначение диака.

Диак чаще всего используется в качестве запускающего устройства для триаков. Каждый раз, когда диак включается, он позволяет току течь через управляющий электрод триака, тем самым включая триак. Диак используется вместе с триаком для обеспечения двухполупериодного управления сигналами переменного тока.

На рис. 24-18 показана двухполупериодная схема с фазовым управлением. Переменный резистор R_1 и конденсатор

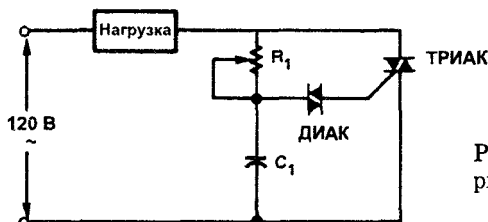


Рис. 24-18. Двухполупериодная схема с фазовым управлением.

C_1 образуют фазосдвигающую цепь. Когда напряжение на конденсаторе C_1 достигает напряжения включения диака, он частично разряжается через диак и управляющий электрод триака. Этот разряд создает импульс, переключающий триак в проводящее состояние. Такая цепь полезна при управлении мощностью ламп, нагревателей и скоростью небольших электродвигателей.

24-3. Вопросы

1. В каких цепях используются диаки?
2. Опишите конструкцию диака.
3. Объясните, как работает диак в цепи.
4. Нарисуйте схематическое обозначение диака.
5. Нарисуйте двухполупериодную схему с фазовым управлением, использующую диак и триак.

24-4. ПРОВЕРКА ТИРИСТОРОВ

Как и другие полупроводниковые устройства, тиристоры могут выходить из строя. Их можно проверить с помощью тестирующего оборудования или омметра.

При использовании тестирующего оборудования для проверки тиристоров обратитесь к инструкции по эксплуатации прибора.

Омметр способен выявить большинство дефектных тиристоров, но не может обнаружить неисправности при работе в предельных режимах, а также использоваться при измерениях в чувствительных к напряжению устройствах. Однако он может дать достаточную информацию о состоянии тиристора.



Проверка КУВ с помощью омметра

1. Определите полярность выводов омметра. Белый вывод является положительным, а черный — отрицательным.
2. Подсоедините выводы омметра — положительный к катоду, а отрицательный к аноду. Сопротивление должно превышать 1 МОм.
3. Поменяйте выводы местами — отрицательный к катоду, а положительный к аноду. Сопротивление опять должно превышать 1 МОм.
4. Оставив выводы омметра подсоединенными, как в п.3, соедините управляющий электрод с анодом. Сопротивление должно упасть до величины, меньшей 1 МОм.
5. Удалите соединение между управляющим электродом и анодом. Если используется низкоомная шкала омметра, то сопротивление должно оставаться низким. Если используется высокоомная шкала омметра, сопротивление должно вернуться к прежнему значению, превышающему 1 МОм. На высокоомных шкалах омметр не обеспечивает достаточного тока, чтобы удержать включенное состояние КУВ при удалении соединения.
6. Отсоедините выводы омметра от КУВ и повторите тест. Так как некоторые омметры не дают однозначного результата на шаге 5, достаточно и шага 4.

Проверка триаков с помощью омметра

1. Определите полярность выводов омметра.
2. Соедините положительный вывод омметра с выводом МТ1, а отрицательный с выводом МТ2. Сопротивление должно быть высоким.
3. Оставив выводы омметра подсоединенными, как в п. 2, соедините управляющий электрод с МТ1. Сопротивление должно упасть.
4. Удалите соединение управляющего электрода с МТ1. Сопротивление должно остаться низким. Омметр может не обеспечить достаточного тока для удержания триака в



открытом состоянии, если управляющий электрод требует большого тока.

5. Отсоедините выводы омметра и соедините их так, как указано в п. 2. Сопротивление опять должно быть высоким.
6. Соедините управляющий электрод с МТ2. Сопротивление должно упасть.
7. Удалите соединение управляющего электрода с МТ2. Сопротивление должно остаться низким.
8. Отсоедините выводы омметра и поменяйте их местами — отрицательный вывод соедините с МТ1, а положительный — с МТ2. Сопротивление должно быть высоким.
9. Соедините управляющий электрод с МТ1. Сопротивление должно упасть.
10. Удалите соединение управляющего электрода с МТ1. Сопротивление должно остаться низким.
11. Отсоедините выводы омметра и снова подсоедините их в такой же конфигурации. Сопротивление опять должно быть высоким.
12. Соедините управляющий электрод с МТ2. Сопротивление должно упасть.
13. Удалите соединение управляющего электрода с МТ2. Сопротивление должно остаться низким.
14. Отсоедините выводы омметра и снова подсоедините их. Сопротивление должно быть высоким.

Проверка диаков с помощью омметра

При проверке диаков с помощью омметра низкое сопротивление в любом направлении указывает на то, что уст-



Рис. 24-19. Динамическая проверка диака.



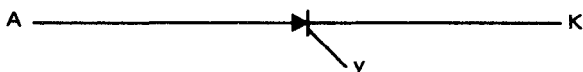
ройство не открыто (неисправно), однако это не свидетельствует о том, что устройство закорочено. Дальнейшая проверка диака требует специальной цепи для проверки напряжения на его выводах (рис. 24-19).

24-4. Вопросы

1. Опишите установку переключателей и показания прибора при проверке КУВ с помощью прибора для проверки транзисторов. (Руководствуйтесь инструкцией по эксплуатации).
2. Опишите установку переключателей и показания прибора при проверке триака с помощью прибора для проверки транзисторов. (Руководствуйтесь инструкцией по эксплуатации).
3. Опишите процедуру проверки КУВ с помощью омметра.
4. Опишите процедуру проверки триака с помощью омметра.
5. Опишите процедуру проверки диака с помощью омметра.

РЕЗЮМЕ

- К тиристорам относятся КУВ (кремниевые управляемые вентили), триаки и диаки.
- КУВ управляют током, текущим в одном направлении, с помощью положительного сигнала на управляющем электроде.
- КУВ запираются при уменьшении напряжения анод-катод до нуля.
- КУВ могут быть использованы для управления током в цепях постоянного и переменного тока.
- Схематическим обозначением КУВ является:



- Триаки — это двунаправленные триодные тиристоры.



- Триаки могут управлять током, текущим в любом направлении, с помощью либо положительного, либо отрицательного сигнала на управляющем электроде.
- Схематическим обозначением триака является:



- КУВ могут управлять токами до 1400 ампер, а триаки — только до 25 ампер.
- КУВ имеют предельные напряжения до 2600 вольт, а триаки — только до 500 вольт.
- КУВ могут работать на частотах до 30000 герц, а триаки — на частотах до 400 герц.
- Поскольку триаки имеют несимметричные запускающие характеристики, для их запуска требуются диаки.
- Диаки — это двунаправленные запускающие диоды.
- Схематическим обозначением диака является:



- Диаки используются главным образом, как запускающие устройства для триаков.
- Тиристоры могут быть проверены с помощью специальных приборов для проверки транзисторов или с помощью омметров.

Глава 24. САМОПРОВЕРКА

1. В чем различие между диодом и КУВ?
2. Как влияет приложенное к аноду напряжение на ток, протекающий через открытый КУВ?
3. Как влияет сопротивление нагрузки на ток, текущий через КУВ?
4. Опишите процесс проверки КУВ.
5. Почему диак используется в цепи управляющего электрода триака?

Глава 25.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Объяснить важность интегральных микросхем.
- Перечислить преимущества и недостатки интегральных микросхем.
- Перечислить основные компоненты интегральной микросхемы.
- Описать четыре процесса, используемых при производстве интегральных микросхем.
- Перечислить основные типы корпусов интегральных микросхем.
- Перечислить семейства интегральных микросхем.

Применение транзисторов и других полупроводниковых устройств, благодаря их малым размерам и незначительному энергопотреблению, позволило существенно уменьшить размеры электронных цепей. В настоящее время стало возможным расширить этот принцип и рассматривать цепи как отдельные компоненты. Целью разработки интегральных микросхем является получение устройства, выполняющего определенную функцию, такую, как например, усиление или переключение, устраняющего разрыв между отдельными компонентами и цепями.

Интегральные микросхемы стали популярными благодаря нескольким факторам:

- Они надежны в сложных цепях.
- Они потребляют малую мощность.
- Они имеют малые размеры и вес.
- Они экономичны в производстве.
- Они предлагают новые и лучшие решения системных задач.



25-1. ВВЕДЕНИЕ В ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

Интегральная микросхема (ИС) — это законченная электронная цепь в корпусе не большем, чем стандартный маломощный транзистор (рис. 25-1). Цепь состоит из диодов, транзисторов, резисторов и конденсаторов. Интегральные микросхемы производятся по такой же технологии и из таких же материалов, которые используются при производстве транзисторов и других полупроводниковых устройств.

Наиболее очевидным преимуществом интегральной микросхемы является ее малый размер. Интегральная микросхема состоит из кристалла полупроводникового материала, размером примерно в один квадратный сантиметр. Благодаря малым размерам интегральные микросхемы находят широкое применение в военных и космических программах. Интегральная микросхема превратила калькулятор из настольного в ручной инструмент. Компьютерные системы, которые раньше занимали целые комнаты, теперь превратились в портативные модели благодаря интегральным микросхемам.

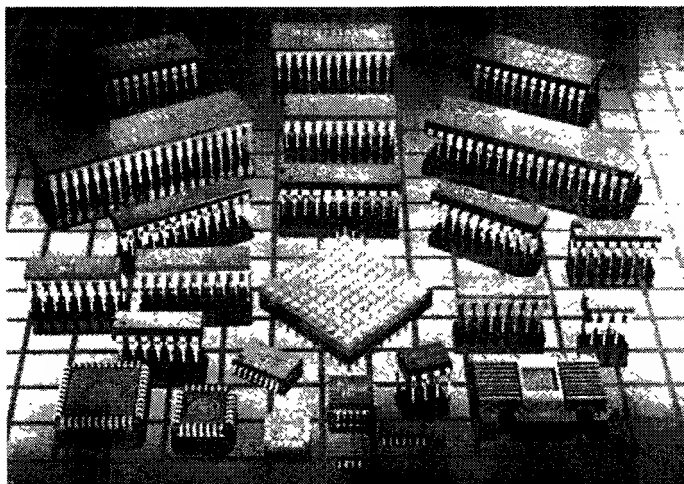


Рис. 25-1. Корпуса интегральных микросхем.



Вследствие малых размеров, интегральные микросхемы потребляют меньшую мощность и работают с более высокой скоростью, чем стандартные транзисторные цепи. Время перемещения электронов уменьшилось благодаря прямой связи внутренних компонент.

Интегральные микросхемы более надежны чем непосредственно связанные транзисторные цепи. В интегральной микросхеме внутренние компоненты соединены непрерывно. Все компоненты сформированы одновременно, что уменьшает вероятность ошибки. После того как интегральная микросхема сформирована, она проходит предварительное тестирование перед окончательной сборкой.

Производство многих типов интегральных микросхем унифицировано, и это приводит к существенному снижению их стоимости. Производители предлагают полные и стандартные линии микросхем. Интегральные микросхемы специального назначения могут производиться и по специальному заказу, но если их количество невелико, это приводит к повышению их стоимости.

Интегральные микросхемы уменьшают количество деталей, необходимых для конструирования электронного оборудования. Это уменьшает списки деталей и, следовательно, накладные расходы производителя, что в дальнейшем снижает цену электронного оборудования.

Интегральные микросхемы имеют также и некоторые недостатки. Они не могут работать при больших значениях тока и напряжения. Большие токи создают избыточное тепло, повреждающее устройство. Высокие напряжения пробивают изоляцию между различными внутренними компонентами. Большинство интегральных микросхем являются маломощными устройствами, питающимися напряжением от 5 до 15 вольт и потребляющими ток, измеряющийся миллиамперами. Это приводит к потреблению мощности, меньшей чем 1 ватт.

Интегральные микросхемы содержат компоненты только четырех типов: диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы. Диоды и транзисторы — самые простые в



изготовлении компоненты. Чем больше сопротивление резистора, тем больше он по размерам. Конденсаторы занимают больше места, чем резисторы, и также увеличиваются в размере по мере увеличения емкости.

Интегральные микросхемы не ремонтируются. Это обусловлено тем, что внутренние компоненты не могут быть отделены друг от друга. Следовательно, проблема ремонта решается заменой микросхемы, а не заменой отдельных компонент. Преимущество этого «недостатка» состоит в том, что он сильно упрощает эксплуатацию систем высокой сложности и уменьшает время, необходимое персоналу для сервисного обслуживания оборудования.

Если все факторы собрать вместе, то преимущества перевесят недостатки. Интегральные микросхемы уменьшают размеры, вес и стоимость электронного оборудования, одновременно увеличивая его надежность. По мере усложнения микросхем, они стали способны выполнять более широкий круг операций.

25-1. Вопросы

1. Дайте определение *интегральной микросхемы*.
2. В чем преимущества интегральных микросхем?
3. В чем недостатки интегральных микросхем?
4. Какие компоненты могут быть включены в интегральные микросхемы?
5. В чем состоит процедура ремонта неисправной интегральной микросхемы?

25-2. ПРОИЗВОДСТВО ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Интегральные микросхемы классифицируются согласно способу их изготовления. Наиболее широко используются следующие способы изготовления: монолитный, тонкопленочный, толстопленочный и гибридный.

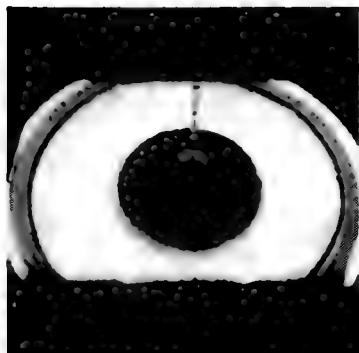
Монолитные интегральные микросхемы изготавливаются так же, как и транзисторы, но включают несколько дополнительных шагов (рис. 25-2). Изготовление интеграль-



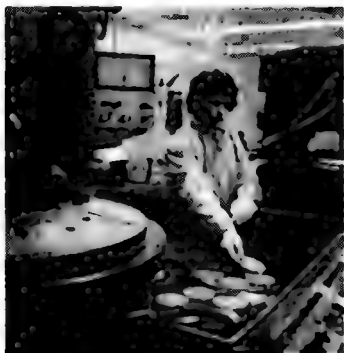
ной микросхемы начинается с круглой кремниевой пластины, диаметром 8–10 сантиметров и около 0,25 миллиметра толщиной. Она служит основой (подложкой), на которой формируется интегральная микросхема. На одной подложке одновременно формируется много интегральных микросхем, до нескольких сотен, в зависимости от размера подложки. Обычно на подложке все микросхемы одинакового размера и типа и содержат одинаковое количество и одинаковые типы компонент.

После изготовления интегральные микросхемы тестируются прямо на подложке. После тестирования подложка разрезается на отдельные чипы. Каждый чип представляет собой одну интегральную микросхему, содержащую все компоненты и соединения между ними. Каждый чип, который проходит тест контроля качества, монтируется в корпус. Несмотря на то, что одновременно изготавливается большое количество интегральных микросхем, далеко не все из них оказываются пригодными для использования. Эффективность производства характеризуют таким параметром как выход. *Выход* — это максимальное число пригодных интегральных микросхем по сравнению с полным числом изготовленных.

Тонкопленочные интегральные микросхемы формируются на поверхности изолирующей подложки из стекла или керамики, обычно размером около 5 квадратных сантиметров. Компоненты (резисторы и конденсаторы) формируются с помощью очень тонких пленок металлов и окислов, наносимых на подложку. После этого наносятся тонкие полоски металла для соединения компонентов. Диоды и транзисторы формируются как отдельные полупроводниковые устройства и подсоединяются в соответствующих местах. Резисторы формируются нанесением тантала или никрома на поверхность подложки в виде тонкой пленки толщиной 0,0025 миллиметра. Величина резистора определяется длиной, шириной и толщиной каждой полоски. Проводники формируются из металлов с низким сопротивлением, таких как золото, платина или



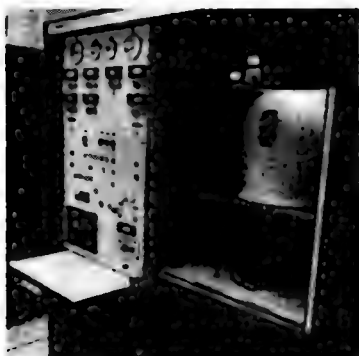
Выращивание кристалла



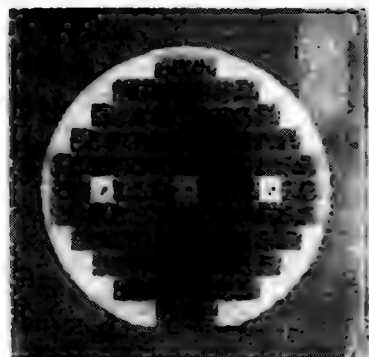
Распиливание слитка



Шлифовка и полировка



Установка для эпитаксиального
наращивания слоев



Маскирование



Проверка интегральной
микросхемы

Рис. 25-2. Монолитный метод изготовления микросхем.



Проверка готового устройства

Рис. 25-2. Продолжение.

алюминий. С помощью этого процесса можно создать резистор с точностью $\pm 0,1\%$. Возможно также получить отношение резисторов с точностью $\pm 0,01\%$. Такие точные отношения важны для правильной работы некоторых цепей.

Тонкопленочные конденсаторы состоят из двух тонких слоев металла, разделенных тонким слоем диэ-

лектрика. Металлический слой нанесен на подложку. После этого на металл наносится слой окисла, образующего диэлектрическую прокладку конденсатора. Она формируется обычно такими изолирующими материалами, как окись тантала, окись кремния или окись алюминия. Верхняя часть конденсатора создается из золота, тантала или платины, нанесенных на диэлектрик. Полученное значение емкости конденсатора зависит от площади электродов, а также от толщины и типа диэлектрика.

Чипы диодов и транзисторов формируются с помощью монокристаллической техники и устанавливаются на подложке. После этого они электрически соединяются с тонкопленочной цепью с помощью очень тонких проводников.

Материалы, используемые для компонентов и проводников, наносятся на подложку методом испарения в вакууме или методом напыления. В процессе испарения в вакууме материал достигает предварительно нагретой подложки, помещенной в вакуум. После этого пары конденсируются на подложке, образуя тонкую пленку.

Процесс напыления происходит в газонаполненной камере при высоком напряжении. Высокое напряжение ионизирует газ, и материал, который должен быть напылен, бомбардируется ионами. Ионы выбивают атомы из напыляемого материала, которые затем дрейфуют по направлению



к подложке, где и осаждаются в виде тонкой пленки. Для осаждения пленки нужной формы и в нужном месте используется маска. Другой метод состоит в покрытии всей подложки полностью и вырезания или вытравливания ненужных участков.

При толстопленочном методе резисторы, конденсаторы и проводники формируются на подложке методом трафаретной печати: над подложкой размещается экран из тонкой проволоки и металлизированные чернила делают сквозь него отпечаток. Экран действует как маска. Подложка и чернила после этого нагреваются до температуры выше 600 градусов Цельсия для затвердевания чернил.

Толстопленочные конденсаторы имеют небольшие значения емкости (порядка пикофарад). В тех случаях, когда требуются более высокие значения емкости, используются дискретные конденсаторы. Толстопленочные компоненты имеют толщину 0,025 миллиметра. Толстопленочные компоненты похожи на соответствующие дискретные компоненты.

Гибридные интегральные микросхемы формируются с использованием монокристаллических, тонкопленочных, толстопленочных и дискретных компонентов. Это позволяет получать цепи высокой степени сложности, применяя монокристаллические цепи, и в то же самое время использовать преимущества высокой точности и малых допусков, которые дает пленочная техника. Дискретные компоненты употребляются потому, что они могут работать при относительно высокой мощности.

Если изготавливается небольшое количество микросхем, то дешевле использовать гибридный метод формирования. При гибридном процессе основные расходы приходятся на соединение и сборку компонентов и упаковку устройства в корпус. Так как гибридные микросхемы используют дискретные компоненты, они больше и тяжелее, чем монокристаллические интегральные микросхемы. Использование дискретных компонентов делает гибридные микросхемы менее надежными, чем монокристаллические.



25-2. Вопросы

1. Какие методы используются для изготовления интегральных микросхем?
2. Опишите процесс изготовления монокристаллических микросхем.
3. В чем различие между тонкопленочным и толстопленочным методами изготовления микросхем?
4. Как изготавливают гибридные микросхемы?
5. Что определяет выбор процесса, который будет использован при изготовлении интегральной микросхемы?

25-3. КОРПУСА ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ

Интегральные микросхемы упаковываются в корпуса, рассчитанные на защиту их от влаги, пыли и других загрязнений. Наиболее популярным является корпус с **двухрядным расположением выводов (DIP)**. Он производится нескольких размеров для того, чтобы соответствовать различным размерам интегральных микросхем: микросхемам *малой* степени интеграции (SSI), микросхемам *средней* степени интеграции (MSI), микросхемам *большой* степени интеграции (LSI или БИС) и *сверхбольшой* интегральным микросхемам (VLSI или СБИС) (рис. 25-3). Корпуса изготавливаются либо из керамики, либо из пластмассы. Пластмассовые корпуса дешевле и более пригодны для применения при рабочей температуре от 0 до 70 градусов Цельсия. Микросхемы в керамических корпусах дороже, но обеспечивают лучшую защиту от влаги и загрязнений. Они,



Рис. 25-3. Семейства интегральных микросхем.



кроме того, работают в более широком диапазоне температур (от -55 до $+125$ градусов Цельсия). Микросхемы в керамических корпусах рекомендуются для использования в военной и аэрокосмической технике, а также в некоторых отраслях промышленности.

Маленький 8-выводный корпус типа DIP используется для устройств с минимальным количеством входов и выходов. В нем располагаются, главным образом, монолитные интегральные микросхемы.

Плоские корпуса меньше и тоньше чем корпуса типа DIP и они используются в случаях, когда пространство ограничено. Они изготавливаются из металла или керамики и работают в диапазоне температур от -55 до $+125$ градусов Цельсия.

После того как интегральная микросхема заключена в корпус, она тестируется для проверки ее соответствия всем требуемым параметрам. Тестирование проводится в широком диапазоне температур.

25-3. Вопросы

1. Каково назначение корпусов интегральных микросхем?
2. Какие корпуса чаще всего используются для интегральных микросхем?
3. Какие материалы используются для корпусов интегральных микросхем?
4. В чем преимущества керамических корпусов?
5. В чем преимущество плоских корпусов интегральных микросхем?

РЕЗЮМЕ

- Интегральные микросхемы популярны, потому что они:
 - более надежны в качестве сложных цепей;
 - потребляют маленькую мощность;
 - являются миниатюрными и легкими;
 - экономичны при изготовлении;



— обеспечивают новые и лучшие решения проблем.

- Интегральные микросхемы не могут работать при больших значениях токов и напряжений.
- Элементами интегральных микросхем могут быть только диоды, транзисторы, резисторы и конденсаторы.
- Интегральные микросхемы нельзя отремонтировать, их можно только заменить.
- Для изготовления интегральных микросхем используются монокристаллический, тонкопленочный, толстопленочный и гибридный способы изготовления.
- Наиболее популярным корпусом интегральных микросхем является корпус типа DIP (с двухрядным расположением выводов)
- Корпуса интегральных микросхем изготавливаются из керамики или пластмассы, но пластмассовые корпуса используются чаще.

Глава 25. САМОПРОВЕРКА

1. Какие компоненты содержат гибридные интегральные микросхемы?
2. Что обозначается словом «чип»?
3. Какие существуют проблемы при изготовлении резисторов и конденсаторов при производстве интегральных микросхем монокристаллическим методом?

Глава 26.

ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить три категории полупроводниковых устройств, которые реагируют на свет.
- Классифицировать основные частотные диапазоны света.
- Перечислить основные светочувствительные устройства и описать их работу и применения.
- Перечислить основные светоизлучающие устройства и описать их работу и применения.
- Нарисовать схематические обозначения оптоэлектронных устройств.
- Перечислить корпуса, используемые для оптоэлектронных устройств.

Полупроводники вообще, и полупроводниковые диоды в частности, широко используются в оптоэлектронике. А именно, в качестве устройств, взаимодействующих с электромагнитным излучением (световой энергией) в видимом, инфракрасном и ультрафиолетовом диапазонах.

Три типа устройств, которые взаимодействуют со светом:

- Устройства для регистрации света;
- Устройства для преобразования света;
- Светоизлучающие устройства.

Полупроводниковый материал и использованная техника легирования определяют длину световой волны для каждого конкретного устройства.

26-1. СВЕТ

Свет — это электромагнитное излучение, видимое человеческим глазом. Свет распространяется подобно радиоволнам. Как и радиоволны, свет имеет свою длину волны.



Свет распространяется в вакууме со скоростью 300000000 метров в секунду. В различных средах скорость света меньше. Частота световых колебаний лежит в диапазоне от 300 до 300000000 гигагерц (1 гигагерц = 1000000000 герц). Из этого частотного диапазона только небольшая часть видима человеческим глазом. Видимый диапазон простирается примерно от 400000 до 750000 гигагерц. Частота инфракрасного излучения лежит ниже 400000 гигагерц, а частота ультрафиолетового излучения — выше 750000 гигагерц. Световые волны в верхней части частотного диапазона обладают большей энергией, чем световые волны в нижней части диапазона.

26-1. Вопросы

1. Что такое свет?
2. В каком частотном диапазоне свет является видимым для человеческого глаза?
3. Что такое инфракрасное излучение?
4. Что такое ультрафиолетовое излучение?
5. Какие световые волны обладают наибольшей энергией?

26-2. СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА

Фоторезистор — это старейшее из оптоэлектронных устройств. Его внутреннее сопротивление изменяется при изменении интенсивности света. Изменение сопротивления не пропорционально интенсивности света. Фотосопротивления изготавливают из светочувствительных материалов, таких как сульфид кадмия (CdS) или селенид кадмия (CdSe).

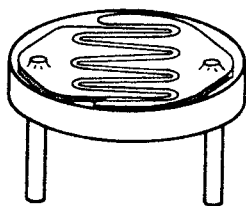


Рис. 26-1. Фотосопротивление.

На рис. 26-1 показано типичное фотосопротивление. Светочувствительный материал нанесен на изолирующую подложку из стекла или керамики в виде S-образной фигуры для увеличения длины фотосопротивления. Фотосопротивление более чувствительно к свету, чем другие



устройства. Его сопротивление может изменяться от нескольких сотен мегом до нескольких сотен ом. Оно применяется при низких интенсивностях света. Фотосопротивление может выдерживать высокие рабочие напряжения 200–300 вольт при малом потреблении мощности — до 300 милливатт. Недостатком фотосопротивлений является медленный отклик на изменения света.



Рис. 26-2. Схематические обозначения фотосопротивления.

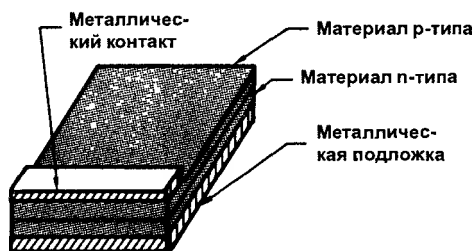
На рис. 26-2 показаны схематические обозначения фотосопротивления. Стрелки показывают, что это — светочувствительное устройство. Иногда для обозначения светочувствительного устройства используется греческая буква лямбда (λ).

Фотосопротивления используются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, в охранных датчиках, в устройствах автоматического открывания дверей, в различном тестирующем оборудовании для измерения интенсивности света.

Фотогальванический элемент (солнечный элемент) преобразует световую энергию непосредственно в электрическую. Батареи солнечных элементов применяются главным образом для преобразования солнечной энергии в электрическую энергию.

Солнечный элемент — это устройство на основе р-п-перехода, выполненное из полупроводниковых материалов. В большинстве случаев их делают из кремния. На рис. 26-3 показано устройство солнечного элемента. Слои р-типа и п-типа образуют р-п-переход. Металлическая подложка и металлический контакт являются электрическими контактами. Они проектируются с большой площадью поверхности.

Свет, попадая на поверхность солнечного элемента, передает большую часть своей энергии атомам полупроводникового материала. Световая энергия выбивает валентные электроны с их орбит, создавая свободные электроны.



Выводы присоединяются к металлической подложке и металлическому контакту

Рис. 26-3. Устройство солнечного элемента.

Вблизи обедненного слоя электроны притягиваются материалом n-типа, создавая небольшое напряжение вдоль р-п-перехода. При увеличении интенсивности света это напряжение увеличивается. Однако не вся световая энергия, попадающая в солнечный элемент, создает свободные электроны. В действительности, при сравнении получаемой от него электрической мощности с мощностью падающей световой энергии легко увидеть, что солнечный элемент — это довольно неэффективное устройство с максимальным коэффициентом полезного действия порядка 15%.

Солнечные элементы дают низкое выходное напряжение 0,45 вольта при токе 50 миллиампер. Их необходимо соединять в последовательно-параллельные цепи для того, чтобы получить желаемое выходное напряжение и ток.

Солнечные элементы применяются для измерения интенсивности света в фотографическом оборудовании, для декодирования звуковой дорожки в кинопроекторах и для зарядки батарей на космических спутниках.

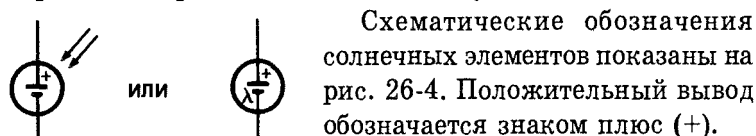


Рис. 26-4. Схематические обозначения солнечного элемента.

Схематические обозначения солнечных элементов показаны на рис. 26-4. Положительный вывод обозначается знаком плюс (+).

Фотодиод также использует р-п-переход и его устройство подобно устройству солнечного элемента. Он используется так же, как и фотосопротивление в качестве резистора, сопротивление которого меняется при освещении. **Фотодиоды** — это полупроводниковые устройства, которые изготавливаются



главным образом из кремния. Это делается двумя способами. Первый способ — создание простого р-п-перехода (рис. 26-5). При другом способе между слоями р-типа и п-типа вставляется слой нелегированного полупроводника, образуя р-і-п фотодиод (рис. 26-6).

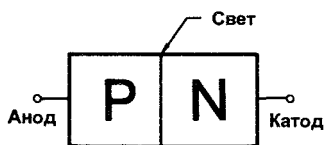


Рис. 26-5. Фотодиод с р-п-переходом.



Рис. 26-6 р-і-п фотодиод.

Принципы работы фотодиода с р-п-переходом такие же как у солнечного элемента, за исключением того, что он используется для управления током, а не для создания его. К фотодиоду прикладывается обратное напряжение смещения, формирующее широкий обедненный электронами слой. Когда свет попадает в фотодиод, он попадает в обедненный слой и создает там свободные электроны. Электроны притягиваются к положительному выводу источника смещения. Через фотодиод в обратном направлении течет малый ток. При увеличении светового потока увеличивается число свободных электронов, что приводит к росту тока.

Р-і-п фотодиод имеет слой нелегированного материала между областями р и п. Это эффективно расширяет обедненный слой. Более широкий обедненный слой позволяет р-і-п фотодиоду реагировать на свет с более низкими частотами. Свет с более низкими частотами имеет меньшую энергию и, следовательно, должен глубже проникать в обедненный слой перед созданием свободных электронов. Более широкий обедненный слой дает больше возможностей для создания свободных электронов. р-і-п фотодиоды являются более эффективными во всех отношениях.

Благодаря слою нелегированного материала, р-і-п фотодиоды имеют более низкую собственную емкость. Это обес-



печивает быстрый отклик на изменения интенсивности света. Кроме того, изменение их обратного тока в зависимости от интенсивности является более линейным.

Преимущество фотодиода — его быстрый отклик на изменения интенсивности света, самый быстрый из всех фоточувствительных устройств. Недостаток — низкая выходная мощность по сравнению с другими фоточувствительными устройствами.

На рис. 26-7 изображен типичный корпус фотодиода. Стеклое окошко позволяет свету попадать в фотодиод. Схематическое обозначение фотодиода показано на рис. 26-8. Типичная цепь изображена на рис. 26-9.

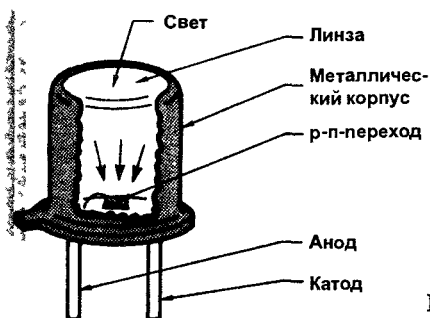


Рис. 26-7. Корпус фотодиода.



Рис. 26-8. Схематическое обозначение фотодиода.

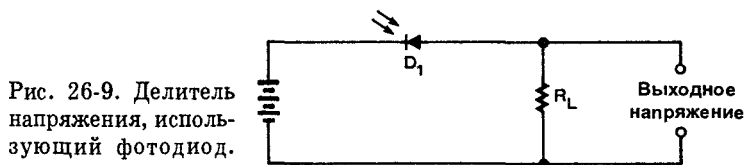


Рис. 26-9. Делитель напряжения, использующий фотодиод.

Фототранзистор устроен подобно другим транзисторам с двумя р-п-переходами. Он похож на стандартный п-р-п транзистор. Используется так же, как и фотодиод, и имеет корпус как у фотодиода, за исключением того, что у него три вывода (эмиттер, база и коллектор). На рис. 26-10

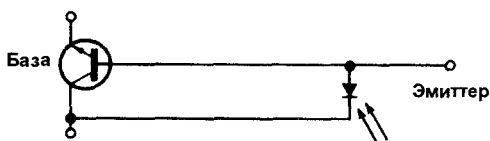


Рис. 26-10. Эквивалентная схема фототранзистора.

показана его эквивалентная цепь. Проводимость транзистора зависит от проводимости фотодиода. Вывод базы применяется редко. Когда он все же используется, на него подается напряжение, открывающее транзистор.

Фототранзисторы могут давать больший выходной ток, чем фотодиоды. Их отклик на изменения интенсивности света не так быстр, как у фотодиодов. В данном случае за увеличение выходного тока приходится жертвовать скоростью отклика.

Фототранзисторы применяются в фототахометрах, для управления фотографической экспозицией, в противопожарных датчиках, в счетчиках предметов и в механических позиционерах.

На рис. 26-11 изображено схематическое обозначение фототранзистора. На рис. 26-12 изображена типичная схема его применения.

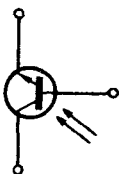


Рис. 26-11. Схематическое обозначение фототранзистора.

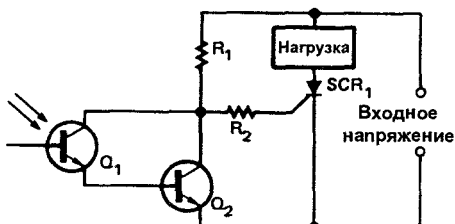


Рис. 26-12. Переключатель нагрузки, питаемый постоянным током, зависящий от освещения (при отсутствии света нагрузка включена).

26-2. Вопросы

1. Объясните, как работает фоторезистор.
2. Объясните, как работает солнечный элемент.



3. В чем разница между двумя типами фотодиодов?
4. Чем фототранзистор лучше фотодиода?
5. Нарисуйте схематические обозначения фоторезистора, солнечного элемента, фотодиода и фототранзистора.

26-3. СВЕТОИЗЛУЧАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА

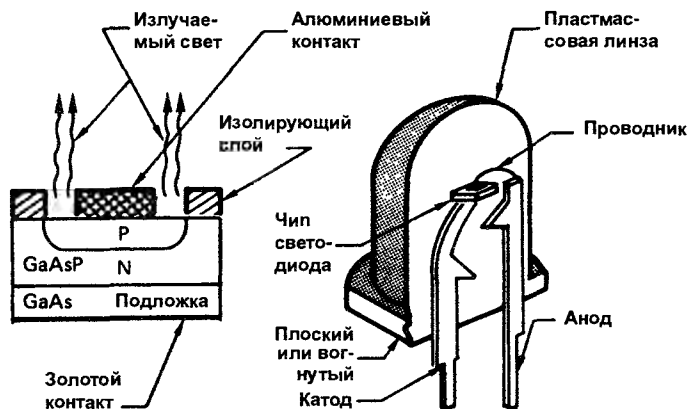
Светоизлучающие устройства излучают свет при прохождении через них тока, преобразуя электрическую энергию в световую. **Светоизлучающий диод** (светодиод) — это наиболее распространенное полупроводниковое светоизлучающее устройство. Будучи полупроводниковым устройством, он имеет неограниченный срок службы ввиду отсутствия высокотемпературного нагрева, основной причины выхода из строя обычных ламп.

Любой р-п-переход может испускать свет при прохождении через него тока. Свет возникает, когда свободные электроны рекомбинируют с дырками, и лишняя энергия освобождается в виде света. Частота испускаемого света определяется типом полупроводникового материала, использованного при изготовлении диода. Обычные диоды не излучают свет потому, что они упакованы в непрозрачные корпуса.

Светодиоды — это просто диоды с р-п-переходом, которые излучают свет при прохождении через них тока. Этот свет виден потому, что светодиоды упакованы в полупрозрачный материал. Частота излучаемого света зависит от материала, использованного при изготовлении светодиода. Арсенид галлия (GaAs) излучает свет в инфракрасном диапазоне, который не воспринимается человеческим глазом. Арсенид-фосфид галлия излучает видимый красный свет. Изменяя содержание фосфора, можно получить светодиоды, излучающие свет различной частоты.

На рис. 26-13 показано устройство светодиода. Слой типа р сделан тонким для того, чтобы не препятствовать прохождению света, излучаемого р-п-переходом.

После изготовления светодиод помещается в корпус, который рассчитан на максимальное пропускание света. На



(А) СХЕМА СВЕТОДИОДА

(Б) ВНУТРИ СВЕТОДИОДА

Рис. 26-13. Устройство светодиода.

Рис. 26-14. Распространенные типы корпусов светодиодов.

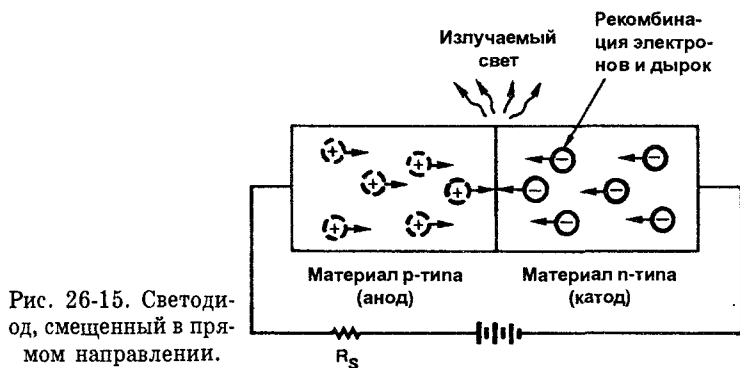


Рис. 26-15. Светодиод, смещенный в прямом направлении.



рис. 26-14 показаны наиболее распространенные корпуса светодиодов. Многие светодиоды содержат линзы, собирающие свет и увеличивающие его интенсивность. Корпус светодиода может также служить светофильтром для того, чтобы обеспечить излучение света определенной частоты.

Для того, чтобы светодиод излучал свет, на него должно быть подано прямое смещающее напряжение (рис. 26-15). Для того, чтобы через светодиод шел ток, величина прямого смещения должна превышать 1,2 вольта. Так как светодиод легко может быть поврежден большим током или напряжением, последовательно с ним включается резистор для ограничения тока.

Схематическое обозначение светодиода показано на рис. 26-16. На рис. 26-17 изображена цепь с правильно поданным смещением. Включенный последовательно резистор (R_s) используется для ограничения прямого тока (I_F).

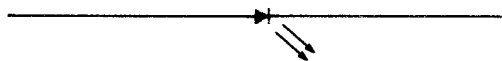


Рис. 26-16. Схематическое обозначение светодиода.

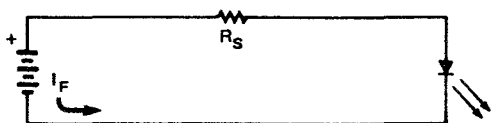
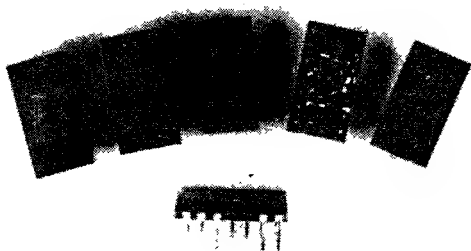


Рис. 26-17. Цепь с правильно смещенным светодиодом.

Рис. 26-18. Семисегментные индикаторы на основе светодиодов для отображения цифр.



На рис. 26-18 показаны сборки светодиодов в виде семисегментных индикаторов, используемых для отображения цифр. На рис. 26-19 показан светодиод, образующий вместе с фотодиодом **оптопару**. Оба устройства размещены в

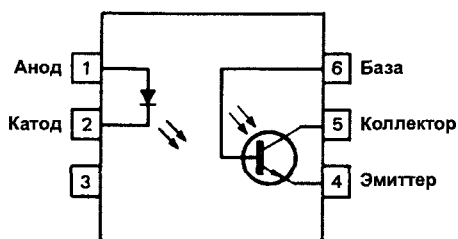


Рис. 26-19: Коммерческая оптопара.

одном корпусе. *Оптопара* состоит из светодиода и фототранзистора. Они связаны световым лучом, излучаемым светодиодом. Сигнал, поступающий на светодиод, может меняться, что, в свою очередь, изменяет интенсивность излучаемого света. Фототранзистор преобразует изменения света опять в электрическую энергию. Оптопара позволяет передавать сигнал от одной цепи к другой, обеспечивая высокую степень электрической изоляции их друг от друга.

26-3. Вопросы

1. Объясните, чем светодиод отличается от обычного диода.
2. Как изменяют цвет излучаемого светодиодом света?
3. Как корпус светодиода может усилить излучаемый свет?
4. Нарисуйте схематическое обозначение светодиода.
5. Каково назначение оптопары?

РЕЗЮМЕ

- Полупроводниковые устройства, которые взаимодействуют со светом, делятся на светорегистрирующие устройства, устройства, преобразующие свет и светоищущие.
- Свет — это электромагнитное излучение, которое воспринимается человеческим глазом.
- Частотные диапазоны света следующие:
 - инфракрасное излучение — менее 400000 гигагерц;
 - видимое излучение — 400000–750000 гигагерц;

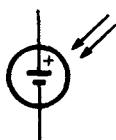


— ультрафиолетовое излучение — более 750000 гигагерц;

- Светочувствительные устройства включают фотосопротивления, солнечные элементы, фотодиоды и фототранзисторы.
- Светоизлучающие устройства включают светодиоды (светоизлучающие диоды).
- Оптопара содержит светочувствительное устройство и светоизлучающее устройство.
- Схематические обозначения светочувствительных устройств следующие:
- Схематическое обозначение светодиода следующее:



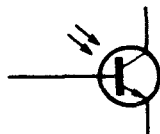
Фотосопротивление



Солнечный элемент



Фотодиод



Фототранзистор



Глава 26. САМОПРОВЕРКА

1. Какое светочувствительное устройство имеет самое быстрое время отклика на изменения интенсивности света?
2. Какое устройство может иметь более широкую область применения — фотодиод или фототранзистор? Почему?
3. Как величина тока, протекающего через фотодиод, влияет на интенсивность излучаемого света?

Раздел 4.

ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ



Специальность — техник по автоматике

Механик по автоматике поддерживает в рабочем состоянии контроллеры, сборочное оборудование, копировальные машины, промышленных роботов и другие автоматизированные или использующие компьютерное управление устройства.

Человек на этой работе устанавливает, ремонтирует и осуществляет сервисное обслуживание механизмов с электрическими, механическими, гидравлическими или пневматическими компонентами. При этом используются точные измерительные инструменты, тестирующее оборудование и ручные инструменты. Для подобной работы требуется знание электроники и умение читать монтажные и принципиальные схемы.

Для того, чтобы стать техником по электронике, необходима официальная подготовка. Такую подготовку дают профессионально-технические школы, военные училища или заочные учебные программы. Хотя в большинстве случаев обучение проводится в виде классных занятий, иногда можно приобрести навыки и практической работы.

Потребность промышленности в техниках по автоматике растет очень быстро. Ожидается, что этот рост будет продолжаться и после 2000 года.

Глава 27.

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Объяснить назначение источника питания.
- Начертить блок-схему цепей и частей источника питания.
- Описать три различных схемы выпрямителей.
- Объяснить назначение фильтра.
- Описать два основных типа регуляторов напряжения и объяснить их работу.
- Объяснить назначение умножителя напряжения.
- Перечислить устройства защиты от превышения напряжения и тока.

Блоки питания используются для подачи напряжения на различные цепи. Принципы работы всех блоков питания одинаковы.

Главной функцией блока питания является преобразование переменного тока в постоянный. Блок питания может увеличивать или уменьшать величину входного переменного напряжения с помощью трансформатора.

Переменное напряжение требуемой величины преобразуется в постоянное напряжение с помощью процесса, который называется выпрямлением. Выпрямленное напряжение еще содержит переменную составляющую, которая называется пульсацией. От пульсаций избавляются с помощью фильтра.

Для обеспечения неизменной величины выходного напряжения используется стабилизатор напряжения. Он удерживает выходное напряжение на постоянном уровне.



27-1. ТРАНСФОРМАТОРЫ

Трансформаторы используются в блоках питания для изоляции блока питания от источника переменного напряжения. Они также применяются для повышения напряжения, если требуется более высокое напряжение, и для понижения напряжения, если требуется более низкое.

Если трансформаторы используются в блоках питания, то источник переменного напряжения подсоединяется только к первичной обмотке трансформатора. Таким образом электрические цепи изолируются от сети переменного тока.

При выборе трансформатора сначала надо определить напряжение первичной обмотки. Первичные обмотки у большинства трансформаторов рассчитаны на напряжения от 110 до 120 вольт или от 220 до 240 вольт. Потом надо уточнить частоту, на которой будет работать трансформатор. Рабочими частотами трансформатора могут быть 50 или 60 герц, 400 герц и 10 000 герц. Затем следует определить напряжение вторичной обмотки и ток, на который она рассчитана. И наконец, надо определить общую расчетную мощность трансформатора в вольт-амперах, что позволит оценить мощность, которая может быть передана во вторичную обмотку трансформатора. Она измеряется в вольт-амперах, так как ко вторичной обмотке может быть подсоединена нагрузка любого типа.

27-1. Вопросы

1. Почему в блоках питания используются трансформаторы?
2. Как подсоединяется трансформатор в блоке питания?
3. Какие важные соображения необходимо принять во внимание при выборе трансформатора для блока питания?
4. Как оценивается мощность трансформатора?

27-2. ВЫПРЯМИТЕЛИ

Выпрямитель — это сердце блока питания. Его функция — преобразование входного переменного напряжения



в постоянное напряжение. В блоках питания применяют три основные схемы выпрямителей: **однополупериодная, двухполупериодная и мостовая.**

На рис. 27-1 изображена схема однополупериодного выпрямителя. Диод размещен последовательно с нагрузкой. Из-за наличия диода ток в цепи течет только в одном направлении.

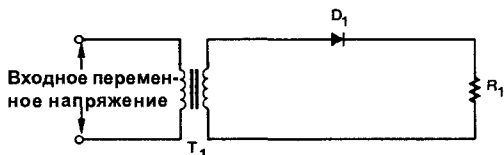


Рис. 27-1. Основная схема однополупериодного выпрямителя.

На рис. 27-2 показан результат работы однополупериодного выпрямителя в течение положительного полупериода синусоиды. Диод смещен в прямом направлении, что позволяет току течь через нагрузку. При этом в течение положительного полупериода на нагрузке выделяется мощность.

На рис. 27-3 представлен результат работы однополупериодного выпрямителя в течение отрицательного полупериода синусоиды. Диод теперь смещен в обратном направлении и не проводит ток. Так как через нагрузку не течет ток, то на ней нет и падения напряжения.

Однополупериодный выпрямитель работает только в течение одной половины периода. Выходное напряжение представляет собой последовательность положительных

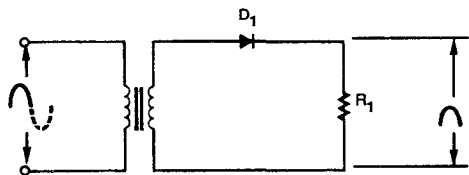
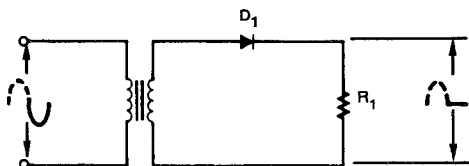


Рис. 27-2. Однополупериодный выпрямитель в течение положительного полупериода.

Рис. 27-3. Однополупериодный выпрямитель в течение отрицательного полупериода.





или отрицательных импульсов, в зависимости от того, как диод включен в цепь. Частота импульсов такая же, как и частота входного напряжения. Частота импульсов называется *частотой пульсаций*.

Полярность выходного напряжения зависит от того, каким способом диод включен в цепь (рис. 27-4). Ток электронов течет через диод от катода к аноду. Когда ток течет через диод, на выводе катода возникает дефицит электронов, делая этот вывод диода положительным. Полярность выходного напряжения блока питания может быть изменена путем изменения способа включения диода.

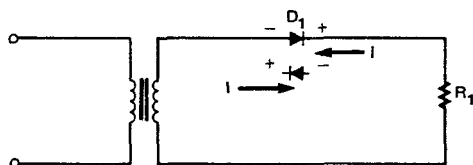


Рис. 27-4. Диод определяет направление тока.

Однополупериодный выпрямитель имеет серьезный недостаток, так как ток через него течет только в течение половины каждого периода. Чтобы избавиться от этого недостатка, используется двухполупериодный выпрямитель.

На рис. 27-5 изображена схема двухполупериодного выпрямителя. Для этой схемы требуются два диода и трансформатор с выводом от середины вторичной обмотки. Этот вывод от середины обмотки заземлен. Напряжение на каждом выводе вторичной обмотки трансформатора сдвинуто по фазе на 180 градусов относительно друг друга.

На рис. 27-6 изображено, как двухполупериодный выпрямитель работает в течение положительного полупериода входного напряжения. На аноде диода D_1 положительный потенциал, а на аноде диода D_2 — отрицательный.

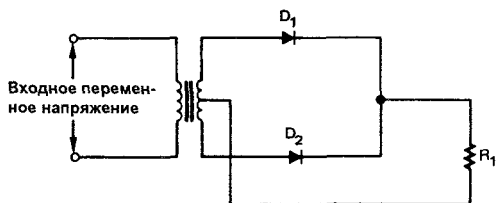


Рис. 27-5. Основная схема двухполупериодного выпрямителя.

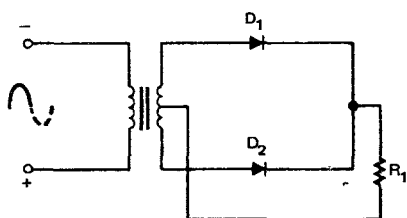
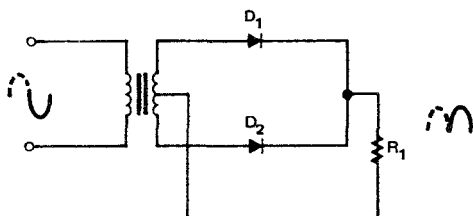


Рис. 27-6. Двухполупериодный выпрямитель в течение положительного полупериода.

Рис. 27-7. Двухполупериодный выпрямитель в течение отрицательного полупериода.



Диод D_1 смещен в прямом направлении и проводит ток. Диод D_2 смещен в обратном направлении и не проводит ток. Ток течет от центрального вывода трансформатора через нагрузку и диод D_1 к верхнему выводу вторичной обмотки трансформатора. Это позволяет ему во время положительного полупериода проходить на нагрузку.

На рис. 27-7 тот же двухполупериодный выпрямитель работает в течение отрицательного полупериода синусоиды. На аноде диода D_2 появился положительный потенциал, а на аноде диода D_1 — отрицательный. Теперь диод D_2 смещен в прямом направлении и проводит ток. Диод D_1 смещен в обратном направлении и не проводит ток. Ток течет от центрального вывода трансформатора через нагрузку и диод D_2 к нижнему выводу вторичной обмотки трансформатора.

Таким образом, в двухполупериодном выпрямителе ток течет в течение обоих полупериодов. Это означает, что частота пульсаций в два раза больше частоты входного переменного тока.

Недостатком двухполупериодного выпрямителя является то, что его выходное напряжение в два раза меньше выходного напряжения однополупериодного выпрямителя, использующего такой же трансформатор. Этот недостаток



преодолевается при использовании мостовой схемы выпрямителя.

На рис. 27-8 изображена мостовая схема выпрямителя. Четыре диода включены таким образом, что ток через нагрузку течет только в одном направлении.

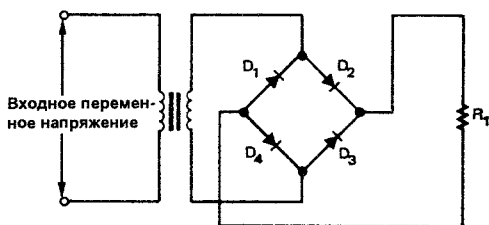


Рис. 27-8. Схема мостового выпрямителя.

На рис. 27-9 показано прохождение тока в течение положительного полупериода входного сигнала. Ток течет от нижнего вывода вторичной обмотки трансформатора через диод D_4 , через нагрузку, через диод D_2 к верхнему выводу вторичной обмотки трансформатора. Все напряжение падает на нагрузке.

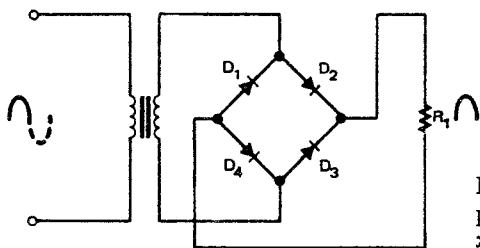


Рис. 27-9. Мостовой выпрямитель в течение положительного полупериода.

На рис. 27-10 показано прохождение тока в течение отрицательного полупериода входного сигнала. На верхнем выводе вторичной обмотки отрицательный потенциал, а на нижнем — положительный. Ток течет от верхнего вывода вторичной обмотки через диод D_1 , через нагрузку, через диод D_3 к нижнему выводу вторичной обмотки. Заметим, что ток течет через нагрузку в том же направлении, что и в течение положительного полупериода. И опять все напряжение падает на нагрузке.

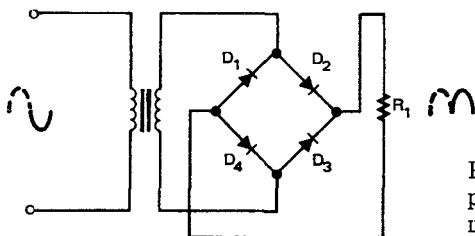


Рис. 27-10. Мостовой выпрямитель в течение отрицательного полупериода.

Мостовой выпрямитель является двухполупериодным выпрямителем, так как он работает в течение обоих полупериодов входного синусоидального напряжения. Преимуществом мостового выпрямителя является то, что он не требует трансформатора с выводом от середины вторичной обмотки. Эта цепь также не требует для своей работы трансформатора. Трансформатор используется только для повышения или понижения напряжения или для обеспечения изоляции от источника переменного напряжения.

Перечислим различия выпрямителей. Преимуществом однополупериодного выпрямителя является его простота и низкая стоимость. Для него требуется один диод и трансформатор. Он не очень эффективен, так как использует только половину входного сигнала. Кроме того, его применение ограничено цепями с малыми токами.

Двухполупериодный выпрямитель более эффективен, чем однополупериодный. Он работает в течение обоих полупериодов синусоиды. Более высокая частота пульсаций двухполупериодного выпрямителя облегчает фильтрацию. Недостатком его является то, что для него требуется трансформатор с отводом от середины вторичной обмотки. Его выходное напряжение ниже, чем у однополупериодного выпрямителя при использовании такого же трансформатора, так как в течение каждого полупериода работает только половина обмотки.

Мостовой выпрямитель может работать без трансформатора. Однако трансформатор бывает необходим для повышения или понижения напряжения. Выходное напряжение у него выше, чем у однополупериодного или двухпо-



лупериодного выпрямителей. Недостатком является то, что для него требуются четыре диода. Однако диоды дешевле трансформатора с выводом от середины вторичной обмотки.

27-2. Вопросы

1. Каково назначение выпрямителя в блоке питания?
2. Каковы три схемы выпрямителей, используемых в блоках питания?
3. В чем отличия в работе этих трех схем?
4. Каковы преимущества одного выпрямителя перед другим?
5. Какая схема выпрямителя является лучшей? Почему?

27-3. ЦЕПИ ФИЛЬТРАЦИИ

Выпрямитель выдает пульсирующее напряжение постоянного тока, которое не годится для питания большинства электронных цепей, поэтому в блоках питания, как правило, после выпрямителя стоит фильтр. **Фильтр** преобразует пульсирующее напряжение в гладкое напряжение постоянного тока.

Простейшим фильтром является конденсатор, включенный параллельно выходу выпрямителя (рис. 27-11). На рис. 27-12 сравнивается выходное напряжение выпрямителя без фильтра и с фильтрующим конденсатором.

Конденсатор работает в такой цепи следующим образом. Когда на аноде диода положительный потенциал, по цепи течет ток. В это время фильтрующий конденсатор заряжается в полярности, показанной на рис. 27-11. За четверть периода входного сигнала конденсатор заряжается до максимального потенциала цепи.

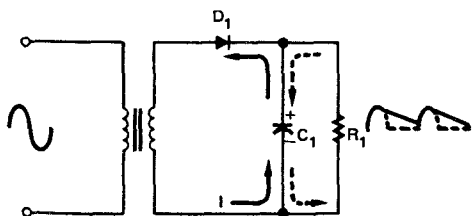


Рис. 27-11 Однополупериодный выпрямитель с емкостным фильтром.

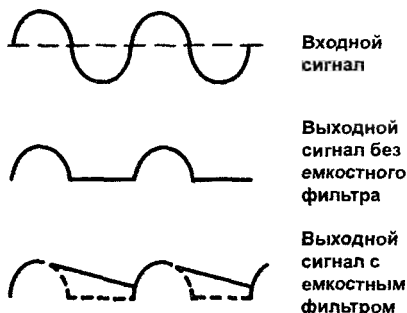


Рис. 27-12. Выходное напряжение однополупериодного выпрямителя без фильтра и с фильтрующим конденсатором.

Когда напряжение входного сигнала начинает падать, конденсатор разряжается через нагрузку. Скорость разряда конденсатора зависит от постоянной времени RC , а, следовательно, от сопротивления нагрузки. Постоянная времени разряда велика по сравнению с периодом переменного тока. Следовательно, период заканчивается раньше, чем конденсатор может разрядиться. Поэтому после первой четверти периода ток через нагрузку поддерживается разряжающимся конденсатором. Как только конденсатор начинает разряжаться, напряжение на нем уменьшается. Однако до того, как конденсатор полностью разрядится, начнется следующий период синусоиды. На аноде диода опять появится положительный потенциал, что позволит ему проводить ток. Конденсатор зарядится снова, и цикл повторится. В результате, пульсации напряжения сгладятся, и выходное напряжение фактически повысится (рис. 27-13).

Чем больше емкость конденсатора, тем больше постоянная времени RC . Это приводит к более медленному разряду конденсатора, что повышает выходное напряжение. Наличие конденсатора позволяет диоду в цепи проводить ток в течение короткого периода времени. Когда диод не проводит, конденсатор обеспечивает нагрузку током. Если нагрузка потребляет большой ток, то должен использоваться конденсатор большой емкости.

Емкостной фильтр в двухполупериодном или мостовом выпрямителе ведет себя точно так же, как и описанный

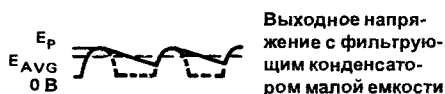
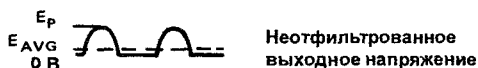


Рис. 27-13. Влияние фильтрующих конденсаторов различной емкости на выходное напряжение однополупериодного выпрямителя.

емкостной фильтр в однополупериодном выпрямителе. На рис. 27-14 показано выходное напряжение двухполупериодного или мостового выпрямителя. Частота пульсаций этого напряжения вдвое больше, чем у однополупериодного выпрямителя. Когда к выходу выпрямителя подсоединяется емкостной фильтр, конденсатор не успевает сильно разрядиться до начала следующего импульса. Выходное напряжение достаточно высокое. Если используется конденсатор большой емкости, то выходное напряжение равно максимальному напряжению входного сигнала. Следовательно, конденсатор лучше фильтрует напряжение в двухполупериодной цепи, чем в однополупериодной.

Назначение фильтрующего конденсатора — сглаживание пульсаций постоянного напряжения выпрямителя. Качество работы фильтра определяется величиной пульсаций,

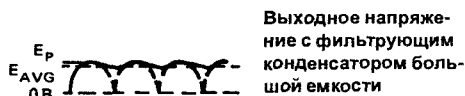
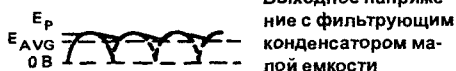
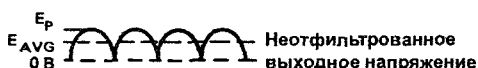


Рис. 27-14. Влияние фильтрующих конденсаторов различной емкости на выходное напряжение двухполупериодного или мостового выпрямителя.



остающихся в постоянном напряжении. Величину пульсаций можно уменьшить путем использования конденсатора большей емкости или путем увеличения сопротивления нагрузки. Обычно сопротивление нагрузки определяется при расчете цепи. Следовательно, емкость фильтрующего конденсатора диктуется допустимой величиной пульсаций.

Необходимо отметить, что фильтрующий конденсатор создает дополнительную нагрузку на диоды, используемые в выпрямителе. На рис. 27-15 изображены однополупериодный и двухполупериодный выпрямители с фильтрующим конденсатором. Конденсатор заряжается до максимального значения напряжения вторичной обмотки и удерживает это значение в течение всего цикла входного напряжения. Когда диод становится смещенным в обратном направлении, он запирается, и максимальное отрицательное напряжение попадает на анод диода. Фильтрующий конденсатор удерживает максимальное положительное напряжение на катоде диода. Разность потенциалов на диоде в два раза превышает максимальное значение напряжения вторичной обмотки. Для выпрямителя должен быть выбран диод, выдерживающий такое напряжение.

Максимальное напряжение, которое может выдержать диод, будучи смещенным в обратном направлении, назы-

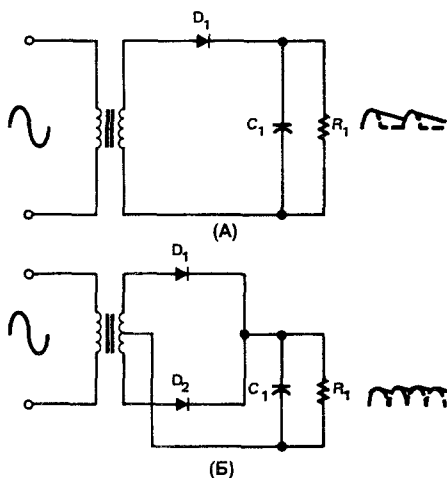


Рис. 27-15. Однополупериодный выпрямитель (А) и двухполупериодный выпрямитель (В) с фильтрующим конденсатором.



вается импульсным обратным напряжением диода. Импульсное обратное напряжение диода, выбранного для выпрямителя, должно быть выше, чем удвоенное максимальное напряжение вторичной обмотки. В идеале диод должен работать при 80% номинального значения обратного напряжения для того, чтобы выдержать изменения входного напряжения. Это касается как однополупериодного, так и двухполупериодного выпрямителя. Но это не так для мостового выпрямителя.

К диодам в мостовом выпрямителе никогда не прикладывается напряжение, большее чем максимальное напряжение вторичной обмотки. На рис. 27-16 ни к одному из диодов не приложено напряжение, превышающее максимальное значение входного сигнала. Использование диодов с более низкими значениями импульсного обратного напряжения является еще одним преимуществом мостового выпрямителя.

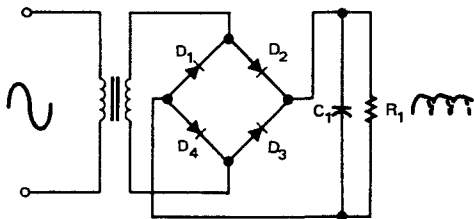


Рис. 27-16. Мостовой выпрямитель с фильтрующим конденсатором.

27-3. Вопросы

1. Каково назначение фильтра в блоке питания?
2. Какова простейшая конфигурация фильтра?
3. Что такое частота пульсаций?
4. Как выбирается конденсатор для фильтра?
5. Какие неблагоприятные эффекты возникают при подключении фильтра?

27-4. РЕГУЛЯТОРЫ И СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ

Выходное напряжение блока питания может изменяться по двум причинам. Во-первых, может изменяться входное



напряжение блока питания, что приводит к увеличению или уменьшению выходного напряжения. Во-вторых, сопротивление нагрузки, что приводит к изменению потребляемого тока.

Многие цепи рассчитаны на работу при определенном напряжении. Если напряжение меняется, это может влиять на работу цепи. Следовательно, блок питания должен обеспечивать выходное напряжение постоянной величины, независимо от изменения нагрузки или входного напряжения. Для того, чтобы этого добиться, после фильтра ставят **регулятор** или **стабилизатор напряжения**.

Существует два основных типа регуляторов напряжения: **параллельные регуляторы** и **последовательные регуляторы**. Их названия соответствуют методу их соединения с нагрузкой. *Параллельный регулятор* подключается к нагрузке параллельно. *Последовательный регулятор* подсоединяется к нагрузке последовательно. Последовательные регуляторы более популярны, чем параллельные, так как они более эффективны и рассеивают меньшую мощность. Параллельный регулятор также работает в качестве управляющего устройства, защищая регулятор от короткого замыкания в нагрузке.

На рис. 27-17 показана регулирующая цепь на основе стабилитрона. Это параллельный регулятор. Стабилитрон соединен последовательно с резистором. Входное постоянное напряжение прикладывается к стабилитрону и резистору и смещает стабилитрон в обратном направлении. Резистор позволяет протекать малому току и поддерживать стабилитрон в области пробоя. Входное напряжение должно быть выше, чем напряжение стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на стабилитроне равно напряжению стабилизации стабилитрона. Падение напряжения на резисторе равно разности между входным напряжением и напряжением стабилизации стабилитрона.

Цепь, изображенная на рис. 27-17, обеспечивает постоянное выходное напряжение при изменениях входного напряжения. Любое изменение напряжения проявляется

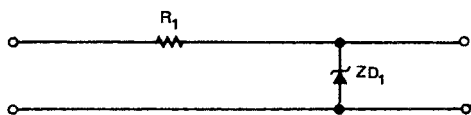


Рис. 27-17. Стабилизирующая цепь на основе стабилитрона.

в виде изменения падения напряжения на резисторе. Сумма падений напряжения должна равняться входному напряжению. Выходное напряжение может быть увеличено или уменьшено путем замены стабилитрона и последовательно включенного резистора.

Ток через нагрузку определяется сопротивлением нагрузки и выходным напряжением. Через последовательно включенный резистор течет суммарный ток, состоящий из тока нагрузки и тока стабилитрона. Этот резистор должен быть тщательно подобран таким образом, чтобы ток через стабилитрон удерживал его в области стабилизации.

Когда ток через нагрузку увеличивается, ток через стабилитрон уменьшается, и сумма этих токов поддерживает напряжение постоянным. Это позволяет цепи поддерживать постоянное выходное напряжение при изменениях выходного тока так же, как и при изменениях входного напряжения.

На рис. 27-18 изображена параллельная регулирующая цепь, использующая транзистор. Заметим, что транзистор Q_1 включен параллельно нагрузке. Это защищает регулятор в случае короткого замыкания в нагрузке. Существуют более сложные параллельные регуляторы, которые используют больше одного транзистора.

Последовательный регулятор популярнее чем параллельный регулятор. Простейшим последовательным регулятором является переменный резистор, включенный последовательно

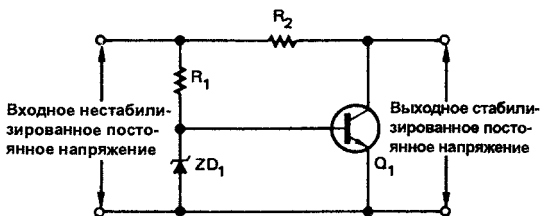


Рис. 27-18. Параллельный стабилизатор, использующий транзистор.



с нагрузкой (рис. 27-19). Сопротивление регулируется непрерывно для поддержания постоянного напряжения на нагрузке. При увеличении постоянного напряжения сопротивление увеличивают, чтобы на нем падало излишнее напряжение. Это сохраняет постоянное падение напряжения на нагрузке, так как избыточное напряжение падает на последовательно включенном резисторе.

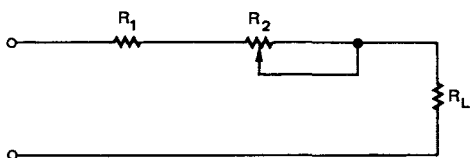


Рис. 27-19. Последовательный регулятор напряжения, использующий переменный резистор.

Переменный резистор может компенсировать и изменения тока нагрузки. При увеличении тока нагрузки падение напряжения на переменном резисторе увеличивается. Это приводит к уменьшению падения напряжения на нагрузке. Если в момент увеличения тока уменьшить сопротивление, то падение напряжения на переменном резисторе останется постоянным. В результате постоянным окажется и выходное напряжение, несмотря на изменения тока нагрузки.

На практике достаточно трудно вручную изменять сопротивление резистора для компенсации изменений напряжения и тока. Более эффективно заменить переменный резистор транзистором (рис. 27-20). Транзистор включен таким образом, что через него течет ток нагрузки. Путем изменения тока базы транзистора можно управлять величиной тока, текущего через транзистор. Для того, чтобы сделать эту цепь саморегулирующейся, требуются дополнительные компоненты (рис. 27-21). Эти компоненты по-

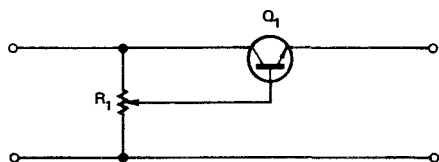


Рис. 27-20. Транзисторный последовательный регулятор напряжения, использующий переменный резистор, регулируемый вручную.

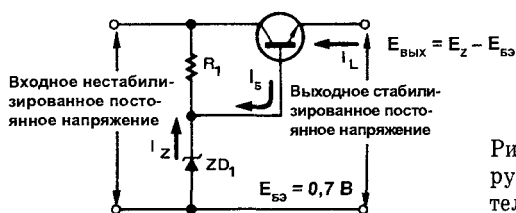


Рис. 27-21. Саморегулирующийся последовательный стабилизатор.

зволяют транзистору автоматически компенсировать изменения входного напряжения и тока нагрузки.

На рис. 27-22 изображен простой последовательный стабилизатор. На его вход подается нестабилизированное постоянное напряжение, а на его выходе получается стабилизированное постоянное напряжение меньшее по величине. Транзистор включен как эмиттерный повторитель, и поэтому здесь отсутствует обращение фазы между базой и эмиттером. Напряжение на эмиттере повторяет напряжение на базе. Нагрузка подключена между эмиттером транзистора и землей. Напряжение на базе транзистора устанавливается с помощью стабилитрона. Следовательно, выходное напряжение равно напряжению стабилизации стабилитрона за вычетом 0,7 вольта падения напряжения на переходе база-эмиттер.

Когда входное напряжение на транзисторе увеличивается, выходное напряжение также пытается увеличиться. Напряжение на базе транзистора установлено с помощью стабилитрона. Если на эмиттере появляется положительный потенциал больший, чем на базе, проводимость транзистора уменьшается. Когда транзистор уменьшает свою проводимость, это действует так же, как включение между

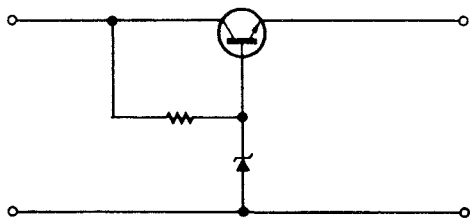


Рис. 27-22. Последовательный стабилизатор.

входом и выходом большого резистора. Большая часть добавившегося входного напряжения падает на транзисторе и только малая его часть увеличит выходное напряжение.

Недостатком стабилизатора с эмиттерным повторителем является то, что стабилитрон должен быть рассчитан на достаточно высокую мощность, а стабилитроны большой мощности стоят дорого.

Наиболее популярным типом последовательных стабилизаторов является стабилизатор с обратной связью. Он содержит цепь обратной связи, контролирующую выходное напряжение. При изменениях выходного напряжения появляется управляющий сигнал. Этот сигнал управляет проводимостью транзистора. На рис. 27-23 изображена блок-схема стабилизатора с обратной связью. Нестабилизированное напряжение постоянного тока подается на вход стабилизатора. Более низкое стабилизированное постоянное напряжение появляется на выходе стабилизатора.

К выходу стабилизатора подключена цепь выбора напряжения. *Цепь выбора напряжения* — это делитель напряжения, который подает выходное напряжение для сравнения на цепь регистрации ошибок. Это напряжение изменяется при изменениях выходного напряжения.

Цепь регистрации ошибок сравнивает выходное напряжение с опорным напряжением. Для получения опорного

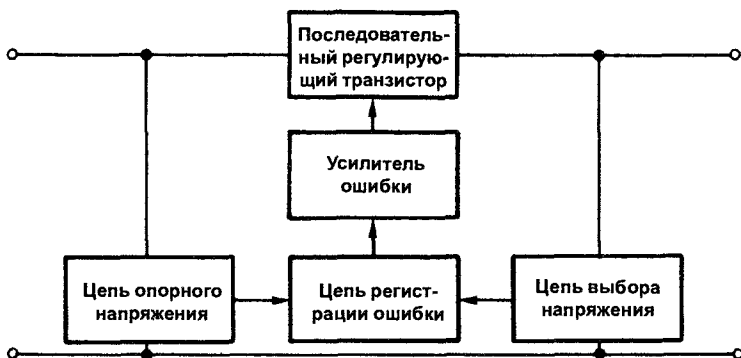


Рис. 27-23. Блок-схема последовательного стабилизатора с обратной связью.



напряжения используется стабилитрон. Разность между выходным и опорным напряжением называется *напряжением ошибки*. Напряжение ошибки усиливается усилителем ошибки. Усилитель ошибки управляет проводимостью последовательно включенного транзистора. Проводимость транзистора меняется в ту или иную сторону для компенсации изменений выходного напряжения.

На рис. 27-24 изображена схема стабилизатора напряжения с обратной связью. Резисторы R_3 , R_4 и R_5 — цепь выбора напряжения. Транзистор Q_2 работает в качестве и регистратора, и усилителя ошибки. Стабилитрон D_1 и резистор R_1 задают опорное напряжение. Транзистор Q_1 — последовательно включенный регулирующий транзистор. Резистор R_2 является коллекторной нагрузкой транзистора Q_2 и подает смещение на базу транзистора Q_1 .

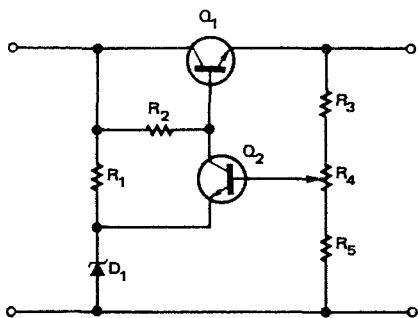


Рис. 27-24. Последовательный стабилизатор с обратной связью.

Если выходное напряжение начинает увеличиваться, то увеличится и напряжение, передаваемое для сравнения. Это увеличит напряжение смещения на базе транзистора Q_2 . Напряжение на эмиттере транзистора Q_2 удерживает постоянным стабилитрон D_1 . Это приводит к увеличению проводимости транзистора Q_2 и увеличению тока через резистор R_2 . Это, в свою очередь, приведет к уменьшению напряжения на коллекторе транзистора Q_2 и на базе транзистора Q_1 . Теперь уменьшатся прямое смещение транзистора Q_1 и его проводимость. Когда проводимость транзистора убывает, через него течет меньший ток. Это снижает



падение напряжения на нагрузке и компенсирует увеличение напряжения.

Выходное напряжение может быть точно установлено с помощью потенциометра R_4 . Для увеличения выходного напряжения стабилизатора движок потенциометра R_4 вращают в отрицательном направлении, что уменьшает напряжение выбора на базе транзистора Q_2 , снижая его прямое смещение. Это приводит к уменьшению проводимости транзистора и к увеличению напряжения на коллекторе транзистора Q_2 и на базе транзистора Q_1 . Последнее увеличивает прямое смещение транзистора Q_1 и его проводимость. Через нагрузку теперь будет течь больший ток, что увеличит выходное напряжение.

Серьезным недостатком последовательного стабилизатора является то, что транзистор включен последовательно с нагрузкой. Короткое замыкание в нагрузке приведет к большому току через транзистор, а это может вывести его из строя. Необходима цепь, поддерживающая ток, проходящий через транзистор, на безопасном уровне.

На рис. 27-25 изображена цепь, которая ограничивает ток через транзистор последовательного стабилизатора. Как видно из рисунка, в цепь обратной связи добавлен последовательный регулятор напряжения. Транзистор Q_3 и резистор R_6 образуют цепь ограничения тока. Для того чтобы транзистор Q_3 проводил, переход база-эмиттер должен быть смещен в прямом направлении напряжением не менее 0,7 вольта. Когда между базой и эмиттером приложено напряжение 0,7 вольта, транзистор начинает проводить.

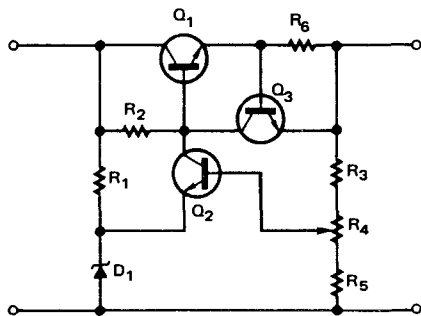


Рис. 27-25. Последовательный стабилизатор с обратной связью с цепью ограничения тока.



Если R_6 равно 1 ому, то ток, необходимый для получения на базе транзистора Q_3 0,7 вольта, равен:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{0,7}{1},$$

$$I = 0,7 \text{ А или } 700 \text{ мА.}$$

Когда через нагрузку протекает ток, меньший 700 мА, напряжение база-эмиттер транзистора Q_3 меньше, чем 0,7 В, и он закрыт. Когда транзистор Q_3 закрыт, цепь работает так, как будто ее не существует. Когда ток превышает 700 мА, падение напряжения на резисторе R_6 превышает 0,7 В. Это приводит к тому, что транзистор Q_3 начинает проводить ток через резистор R_2 . Это уменьшает напряжение на базе транзистора Q_1 , и его проводимость уменьшается. Ток не может превышать 700 мА. Величина предельного тока может быть изменена путем изменения величины резистора R_6 . Увеличение R_6 уменьшает величину предельного тока.

Последовательный стабилизатор с обратной связью имеет еще один недостаток — значительное количество компонентов. Эта проблема может быть решена путем использования стабилизатора на интегральной микросхеме.

Современные стабилизаторы на интегральных микросхемах дешевы и просты в применении. Большинство стабилизаторов на интегральных микросхемах имеют только три вывода (вход, выход и земля) и могут быть подсоединены непосредственно к выходу фильтра выпрямителя (рис. 27-26). Стабилизаторы на интегральных микросхемах обеспечивают широкий диапазон выходных напряжений как положительной, так и отрицательной полярности. Если стабилизатора с нужным напряжением нет среди стандартных микросхем, то существуют микросхемы стабилизаторов с регулируемым напряжением.

При выборе микросхемы стабилизатора необходимо знать напряжение и ток нагрузки, а также электрические характеристики нестабилизированного блока питания. Микросхемы стабилизаторов классифицируются по их

ТО-220
корпус

1 2 3

Вывод 1 Вход
Вывод 2 Земля
Вывод 3 Выход

ТО-3 корпус



1 2

Вывод 1 Вход
Вывод 2 Земля
Вывод 3 Выход



7805	5 вольт	7815	15 вольт
7806	6 вольт	7818	18 вольт
7808	8 вольт	7824	24 вольт
7812	12 вольт		

Распространенные
напряжения стабилизации

Рис. 27-26. Микросхема стабилизатора с тремя выводами.

выходному напряжению. Микросхемы стабилизаторов с фиксированным выходным напряжением имеют три вывода и обеспечивают только одно выходное напряжение. Существуют микросхемы стабилизаторов напряжения как положительной, так и отрицательной полярности. Двухполярные стабилизаторы напряжения обеспечивают и положительное и отрицательное напряжения. Микросхемы стабилизаторов с регулируемым напряжением существуют как в однополярном, так и в двухполярном вариантах. При использовании любых микросхем стабилизаторов напряжения обращайтесь к данным, предоставляемым производителем.

27-4. Вопросы

1. Каково назначение стабилизатора напряжения в блоке питания?
2. Каковы два основных типа стабилизаторов напряжения?
3. Стабилизаторы напряжения какого типа используются чаще?
4. Нарисуйте схему простого стабилизатора напряжения на стабилитроне и объясните, как она работает.
5. Нарисуйте блок-схему последовательного стабилизатора с обратной связью и объясните, как он работает.

27-5. УМНОЖИТЕЛИ НАПЯЖЕНИЯ

Во всех случаях напряжение постоянного тока ограничено амплитудным значением входного синусоидального напряжения. Когда требуются более высокие постоянные



напряжения, используется повышающий трансформатор. Однако более высокие постоянные напряжения могут быть получены и без повышающего трансформатора. Цепи, которые способны создавать высокие постоянные напряжения без помощи трансформатора, называются **умножителями напряжения**. Умножителями напряжения являются **удвоитель напряжения** и **утроитель напряжения**.

На рис. 27-27 изображен однополупериодный удвоитель напряжения. Он создает выходное постоянное напряжение, которое в два раза больше максимального значения входного сигнала. На рис. 27-28 изображена работа этой цепи в течение отрицательного полупериода входного сигнала. Диод D_1 проводит, и ток течет по указанному пути. Конденсатор C_1 заряжается до максимального напряжения входного сигнала. Поскольку путь разряда отсутствует, то конденсатор C_1 остается заряженным. На рис. 27-29 изображен положительный полупериод входного сигнала. В этот момент конденсатор C_1 заряжен до отрицательного максимального значения. Это запирает диод D_1 и открывает диод D_2 , что позволяет диоду D_2 проводить, заряжая конденсатор C_2 . Поскольку конденсатор C_1 заряжен до максимального

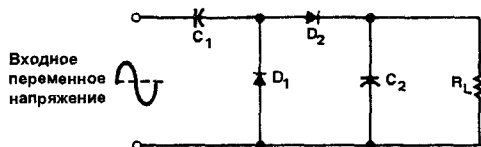


Рис. 27-27. Однополупериодный удвоитель напряжения.

Рис. 27-28. Однополупериодный удвоитель напряжения в течение отрицательного полупериода входного сигнала.

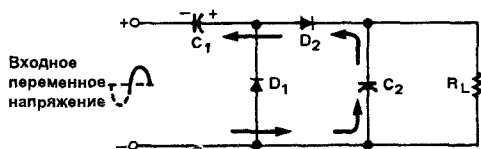
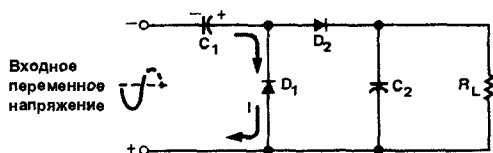


Рис. 27-29. Однополупериодный удвоитель напряжения в течение положительного полупериода входного сигнала.



отрицательного значения, конденсатор C_2 заряжается до удвоенного максимального значения входного сигнала.

Как только синусоида меняет знак с положительного на отрицательный, диод D_2 отсекается. Это обусловлено тем, что конденсатор C_2 удерживает диод D_2 смещенным в обратном направлении. Конденсатор C_2 разряжается через нагрузку, удерживая напряжение на нагрузке постоянным. Следовательно, он работает также и в качестве фильтрующего конденсатора.

Конденсатор C_2 разряжается только в течение положительного полупериода входного сигнала, обеспечивая частоту пульсаций 60 герц (и название однополупериодного удвоителя напряжения). Напряжение, полученное от однополупериодного удвоителя напряжения трудно фильтруется, так как оно имеет частоту пульсаций 60 герц. Другим недостатком этого удвоителя является то, что конденсатор C_2 должен быть рассчитан на напряжение, которое, по крайней мере, вдвое превышает максимальное значение входного сигнала переменного тока.

Двухполупериодный удвоитель напряжения свободен от некоторых недостатков однополупериодного удвоителя напряжения. На рис. 27-30 изображена схема цепи, которая работает как двухполупериодный удвоитель напряжения. На рис. 27-31 показано, что в течение положительного полупериода входного сигнала конденсатор C_1 заряжается через диод D_1 до максимального значения входного сигнала переменного тока. На рис. 27-32 показано, что в течение отрицательного полупериода конденсатор C_2 заряжается через диод D_2 до максимального значения входного сигнала.

Когда входной сигнал переменного тока меняет знак, конденсаторы C_1 и C_2 последовательно разряжаются через

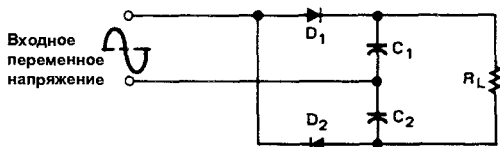


Рис. 27-30. Двухполупериодный удвоитель напряжения.

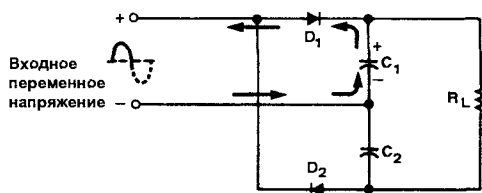
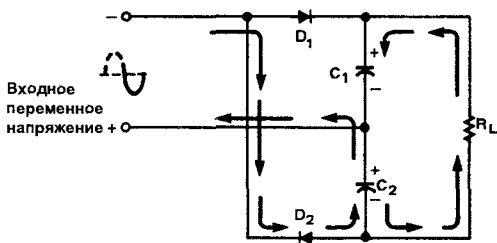


Рис. 27-31. Однополупериодный удвоитель напряжения в течение положительного полупериода входного сигнала.

Рис. 27-32. Двухполупериодный удвоитель напряжения в течение отрицательного полупериода входного сигнала.



нагрузку. Поскольку каждый конденсатор заряжен до максимального значения входного сигнала, полное напряжение на нагрузке будет в два раза больше максимального значения входного сигнала.

Конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются до достижения максимумов входного сигнала. Так как оба конденсатора заряжаются в течение обоих полупериодов, то частота пульсаций полученного напряжения будет 120 герц. Конденсаторы C_1 и C_2 суммируют свое напряжение на нагрузке.

Рис. 27-33 представляет схему утроителя напряжения. На рис. 27-34 показано, как положительный полупериод открывает диод D_1 , и он начинает проводить. В результате конденсатор C_1 заряжается до максимального значения входного сигнала и создает положительный потенциал на диоде D_2 .

На рис. 27-35 изображено действие отрицательного полупериода входного сигнала. Так как диод D_2 теперь смещен в прямом направлении, через него течет ток к конденсатору C_1 через конденсатор C_2 . Поскольку на конденсаторе C_1 сохранилось напряжение, конденсатор C_2 заряжается до удвоенного максимального значения.

На рис. 27-36 показан следующий положительный полупериод. В течение этого полупериода на конденсаторе C_2

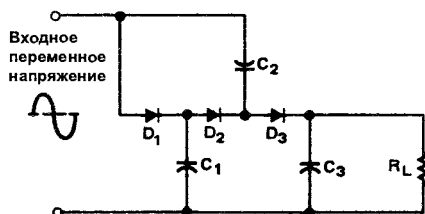


Рис. 27-33. Утроитель напряжения.

Рис. 27-34. Утроитель напряжения в течение первого положительного полуцикла входного сигнала.

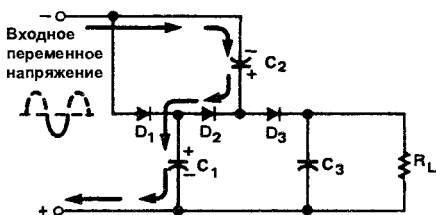
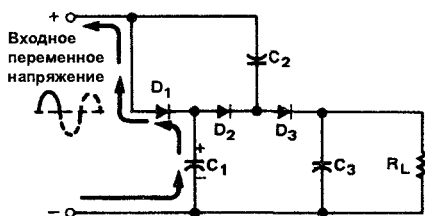
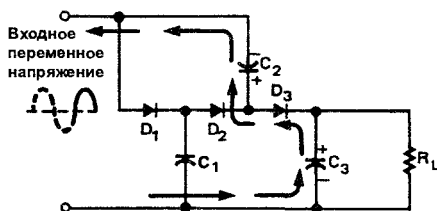


Рис. 27-35. Утроитель напряжения в течение отрицательного полуцикла входного сигнала.

Рис. 27-36. Утроитель напряжения в течение второго положительного полуцикла входного сигнала.



создается разность потенциалов, которая в три раза больше максимального входного значения. Верхняя обкладка конденсатора C_2 заряжена положительно до удвоенного максимального значения напряжения. Анод диода D_2 имеет положительный потенциал, равный утроенному значению максимального значения напряжения по отношению к земле, следовательно, конденсатор C_3 заряжен до утроенного значения максимального значения напряжения. Это напряжение и прикладывается к нагрузке.



27-5. Вопросы

1. Для чего предназначен умножитель напряжения?
2. Нарисуйте схему однополупериодного удвоителя напряжения и объясните, как он работает.
3. Нарисуйте схему двухполупериодного удвоителя напряжения.
4. Нарисуйте схему утроителя напряжения.
5. Какие требования должны предъявляться к конденсаторам, используемым в цепях удвоения и утроения напряжения?

27-6. УСТРОЙСТВА ЗАЩИТЫ ЦЕПЕЙ

Для защиты нагрузки от неисправности в блоке питания используется **цепь защиты от превышения напряжения**. На рис. 27-37 изображена схема защиты от превышения напряжения. КУВ, подключенный параллельно нагрузке, в нормальном состоянии закрыт (не проводит). Если выходное напряжение превышает установленный уровень, КУВ открывается и закорачивает нагрузку. Когда нагрузка закорочена, через нее течет очень маленький ток. Это полностью защищает нагрузку. Однако закорачивание нагрузки не защищает блок питания, так как при этом закорачивается выход блока питания. Это пережигает предохранитель в блоке питания.

Стабилитрон устанавливает уровень напряжения, при котором КУВ открывается. Он защищает нагрузку от напряжений, превышающих напряжение стабилизации. До тех пор, пока приложенное напряжение меньше, чем напряжение стабилизации стабилитрона, он не проводит ток. Это удерживает КУВ в запертом состоянии.

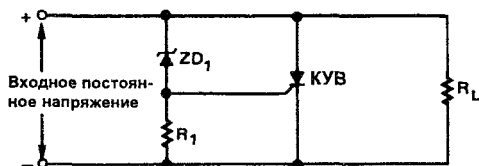


Рис. 27-37. Цепь защиты от превышения напряжения на основе КУВ.



Если приложенное напряжение превышает напряжение стабилизации вследствие неправильной работы блока питания, стабилитрон начинает проводить. Это создает ток управляющего электрода КУВ, он открывается и закорачивает нагрузку. Необходимо заметить, что КУВ должен быть достаточно мощным для работы при большом токе короткого замыкания.

Другим устройством защиты является **плавкий предохранитель** (рис. 27-38). *Плавкий предохранитель* — устройство, которое выходит из строя при перегрузке. Плавкий предохранитель — это просто кусочек проволоки, соединяющий два металлических вывода. Полый стеклянный цилиндр отделяет выводы друг от друга и защищает проволоку. Обычно плавкий предохранитель включают последовательно с первичной обмоткой трансформатора блока питания. Если через блок питания течет большой ток, то проволока предохранителя перегревается и плавится. Цепь размыкается, и ток прерывается. Стеклянный цилиндр предохранителя позволяет визуально проверить пригодность предохранителя.

Предохранители делятся на обычные и с замедлением. *Обычные* предохранители перегорают сразу же при превышении тока. В некоторых цепях это является преимуществом, так как быстро устраняется перегрузка. *Предохранитель с замедлением* может выдерживать короткий период перегрузки перед тем, как расплавиться. Это происходит

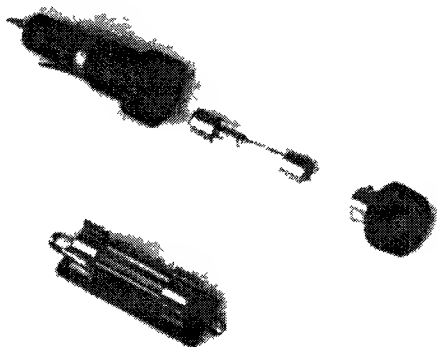


Рис. 27-38. Плавкие предохранители, используемые для защиты электронных цепей.



потому, что в таком предохранителе проволока нагревается медленнее. Если перегрузка имеет место в течение более чем нескольких секунд, она расплавляет предохранитель. Предохранитель с замедлением может содержать спираль в состоянии оттягивания момента расплавления. Некоторые цепи могут противостоять току перегрузки. В таких цепях использование предохранителя с замедлением предпочтительнее обычного.

Предохранитель всегда устанавливается после выключателя на «горячем» выводе (фазе) источника переменного тока. В результате трансформатор отсоединяется от источника переменного тока при перегорании предохранителя. При установке предохранителя после выключателя сеть может быть отключена от держателя предохранителя для обеспечения безопасности при замене предохранителя. Плавкий предохранитель не следует заменять до тех пор, пока неисправность не будет обнаружена и исправлена.

Недостатком плавкого предохранителя является то, что после каждого перегорания его необходимо заменять. **Размыкатель цепи** выполняет такую же работу, но не требует замены после каждой перегрузки. Вместо этого размыкатель цепи может быть вручную установлен в исходное положение после перегрузки (рис. 27-39). Размыкатели цепи включаются в цепь так же, как и предохранители.

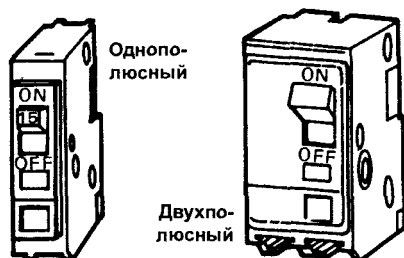


Рис. 27-39. Размыкатели цепи, используемые для защиты электронных цепей.

27-6. Вопросы

1. Как работает схема защиты от превышения напряжения на основе КУВ?



2. Как работает плавкий предохранитель, когда он используется в цепи?
3. Какие бывают типы предохранителей?
4. В каком месте цепи устанавливается предохранитель?
5. В чем преимущество размыкателя цепи перед предохранителем?

РЕЗЮМЕ

- Основным назначением блока питания является преобразование переменного тока в постоянный.
- Трансформаторы используются в блоках питания для изоляции и для повышения или понижения напряжения.
- Выпрямитель преобразует входное переменное напряжение в пульсирующее постоянное напряжение.
- Основными выпрямительными цепями являются: однополупериодная, двухполупериодная и мостовая.
- Однополупериодные выпрямители проще и дешевле, чем двухполупериодные и мостовые.
- Двухполупериодный выпрямитель более эффективен, чем однополупериодный.
- Мостовой выпрямитель может работать без трансформатора.
- Для преобразования пульсирующего постоянного напряжения в сглаженное постоянное напряжение после выпрямителя должен использоваться фильтр.
- Конденсатор, подсоединенный параллельно нагрузке является эффективным фильтром.
- Стабилизатор напряжения обеспечивает постоянное выходное напряжение, несмотря на изменения входного напряжения и тока нагрузки.
- Стабилизатор напряжения устанавливается в цепи после фильтра.
- Основными типами стабилизаторов являются параллельный и последовательный.
- Последовательный стабилизатор более эффективен и, следовательно, более популярен, чем параллельный.



- Умножители напряжения — это цепи, которые способны обеспечить более высокие, чем входные, напряжения постоянного тока без использования трансформатора.
- Для защиты от превышения напряжения используется цепь на основе КУВ.
- Плавкий предохранитель защищает цепь от перегрузки по току.
- Предохранители делятся на обычные и с замедлением.
- Размыкатели цепи выполняет такую же работу, что и предохранители, но не требуют замены после каждой перегрузки.

Глава 27. САМОПРОВЕРКА

1. Какие четыре параметра надо учитывать при выборе трансформатора для блока питания?
2. Каково назначение трансформатора в блоке питания?
3. Для каких целей служит выпрямитель в блоке питания?
4. Каковы достоинства и недостатки двухполупериодного и мостового выпрямителей?
5. Опишите процесс, с помощью которого фильтрующий конденсатор преобразует пульсирующее постоянное напряжение в сглаженное.
6. На основе каких соображений выбирается величина фильтрующего конденсатора?
7. Как последовательный стабилизатор поддерживает выходное напряжение на постоянном уровне?
8. Какие характеристики цепи должны быть известны при выборе стабилизирующей цепи?
9. Для каких целей служат умножители напряжения?
10. Каковы преимущества двухполупериодного удвоителя напряжения по сравнению с однополупериодным удвоителем напряжения?
11. Какие устройства используются для защиты от превышения напряжения?
12. Какие устройства используются для защиты от превышения тока?

Глава 28. УСИЛИТЕЛИ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать назначение усилителя.
- Перечислить три основных типа транзисторных усилительных цепей.
- Перечислить классы усилителей.
- Описать работу усилителей с непосредственной связью, усилителей звуковой частоты, видеоусилителей, усилителей радиочастоты, усилителей промежуточной частоты и операционных усилителей.
- Нарисовать принципиальные схемы усилителей различных типов.

Усилители — это электронные цепи, используемые для увеличения амплитуды электрического сигнала. Цепь, рассчитанная на преобразование низкого напряжения в высокое, называется усилителем напряжения. Цепь, рассчитанная на преобразование слабого тока в большой по величине, называется усилителем тока.

28-1. ТИПЫ УСИЛИТЕЛЕЙ

Для обеспечения **усиления** транзистор должен принять входной сигнал и выдать выходной, значительно больший, чем входной.

Входной сигнал управляет током, текущим через транзистор. Этот ток, в свою очередь, управляет напряжением на нагрузке. Транзисторная цепь рассчитана таким образом, чтобы брать напряжение от внешнего источника питания (V_{cc}) и подавать его на резистор нагрузки (R_L) в виде выходного напряжения.

Транзистор используется, главным образом, как усильтельное устройство. Существует несколько способов вклю-



чения в цепь транзистора: **схема с общей базой, схема с общим эмиттером и схема с общим коллектором**. В каждой из этих схем один из выводов транзистора служит общей точкой, а два других являются входом и выходом. Каждая схема может быть собрана как с р-п-р, так и с п-р-п транзистором. В каждом случае на переход эмиттер-база подается напряжение смещения в прямом направлении, а на переход коллектор-база — в обратном. Каждая схема имеет преимущества и недостатки.

В схеме с общей базой (рис. 28-1) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной наблюдается в цепи коллектор-база. База является общим элементом для входа и выхода.

В схеме с общим эмиттером (рис. 28-2) входной сигнал подается в цепь эмиттер-база, а выходной сигнал снимается

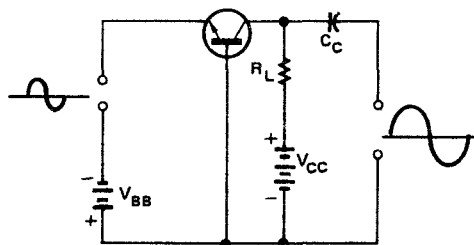


Рис. 28-1. Схема усилителя с общей базой.

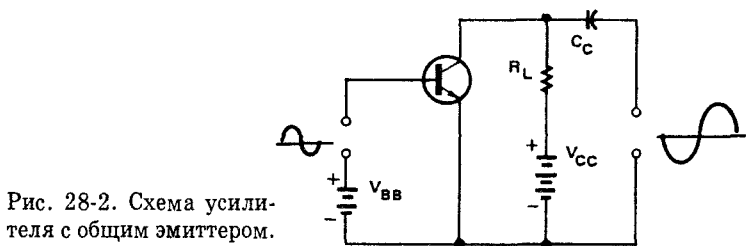


Рис. 28-2. Схема усилителя с общим эмиттером.

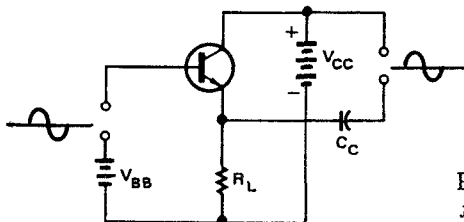


Рис. 28-3. Схема усилителя с общим коллектором.



с нагрузки в цепи коллектор-эмиттер. Эмиттер является общим для входа и выхода. Этот способ включения транзистора используется наиболее широко.

Третий тип соединения (рис. 28-3) — это схема с общим коллектором. В этой схеме входной сигнал подается в цепь база-коллектор, а выходной сигнал снимается с цепи эмиттер-коллектор. Здесь коллектор является общим для входа и выхода. Эта схема используется для согласования импедансов.

Тип цепи	Входное сопротивление	Выходное сопротивление	Усиление по напряжению	Усиление по току	Усиление по мощности
Общая база	Низкое	Высокое	Высокое	Меньше 1	Среднее
Общий эмиттер	Среднее	Среднее	Среднее	Среднее	Высокое
Общий коллектор	Высокое	Низкое	Меньше 1	Среднее	Среднее

Рис. 28-4. Характеристики усилительных цепей.

В таблице, изображенной на рис. 28-4, приведены входные и выходные сопротивления, а также величина усиления по напряжению, току и мощности для трех схем включения транзистора. На рис. 28-5 показаны фазовые соотношения входного и выходного сигналов для трех схем включения транзистора. Заметим, что схема с общим эмит-

Тип усилителя	Форма входного сигнала	Форма выходного сигнала
Общая база		
Общий эмиттер		
Общий коллектор		

Рис. 28-5. Фазовые соотношения между входным и выходным сигналами усилительных цепей.



тером обеспечивает изменение фазы выходного сигнала на 180° по отношению к фазе входного.

28-1. Вопросы

1. Нарисуйте схемы трех основных конфигураций транзисторных усилительных цепей.
2. Перечислите характеристики:
 - а. Цепи с общей базой;
 - б. Цепи с общим эмиттером;
 - в. Цепи с общим коллектором.
3. Составьте таблицу, показывающую фазовые соотношения входного и выходного сигналов для трех схем включения транзистора.
4. Составьте таблицу, показывающую входные и выходные сопротивления для трех схем включения транзистора.
5. Составьте таблицу, показывающую усиление по напряжению, току и мощности для трех схем включения транзистора.

28-2. ЦЕПИ СМЕЩЕНИЯ УСИЛИТЕЛЯ

Основными конфигурациями транзисторных усилительных цепей являются схемы с общей базой, с общим эмиттером и с общим коллектором. Для подачи правильного напряжения смещения на n - p - n или p - n - p переходы все они требуют двух источников тока. На переход база-эмиттер должно быть подано смещение в прямом направлении, а на переход база-коллектор — в обратном направлении. Однако оба напряжения смещения могут быть обеспечены с помощью одного источника тока.

Поскольку цепи с общим эмиттером используются наиболее часто, они детально описываются. Те же принципы применимы и к цепям с общей базой и общим коллектором.

На рис. 28-6 изображен транзисторный усилитель с общим эмиттером, использующий один источник питания. Эта же цепь схематически изображена на рис. 28-7. Источник питания обозначен $+V_{cc}$. Символ заземления является

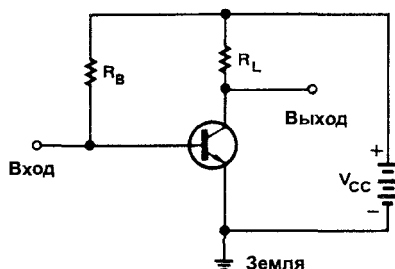
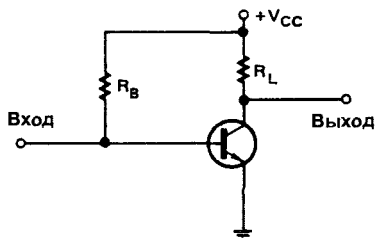


Рис. 28-6. Усилитель с общим эмиттером и одним источником питания.

Рис. 28-7. Схематическое представление усилителя с общим эмиттером и одним источником питания.



отрицательным выводом источника питания V_{CC} . Один источник питания обеспечивает подачу правильного напряжения смещения для переходов база-эмиттер и база-коллектор. Два резистора (R_B и R_L) используются для распределения напряжения, обеспечивающего правильную работу транзистора. Резистор R_L , сопротивление нагрузки коллектора, соединен последовательно с коллектором. Когда через коллектор течет ток, на резисторе R_L появляется падение напряжения. Падение напряжения на резисторе R_L и падение напряжения на переходе коллектор-эмиттер транзистора должны в сумме равняться приложенному напряжению.

Резистор R_B , соединяющий базу с источником питания, управляет величиной тока базы. Ток базы, текущий через резистор R_B , создает на нем падение напряжения, составляющего большую часть напряжения источника питания. Меньшая часть этого напряжения падает на переходе база-эмиттер транзистора, обеспечивая правильное прямое смещение.

Один источник питания может обеспечить необходимые напряжения прямого и обратного смещения. В случае $n-p-n$



транзистора потенциал на базе и коллекторе транзистора должен быть положительным по отношению к эмиттеру. Следовательно, источник питания может быть связан с базой и коллектором через резисторы R_B и R_L . Эту цепь часто называют цепью смещения базы, так как ток базы управляется величиной резистора R_B и напряжением источника питания.

Входной сигнал подключается между базой транзистора и его эмиттером или между выводом входа и землей. Значение входного сигнала либо складывается с прямым смещением на эмиттерном переходе, либо вычитается из него. Это служит причиной изменения коллекторного тока, что, в свою очередь, приводит к изменению падения напряжения на резисторе R_L . Выходной сигнал появляется между выводом выхода и землей.

Цепь, изображенная на рис. 28-6, является нестабильной, так как она не может компенсировать изменения тока смещения при отсутствии сигнала. Изменения температуры приводят к изменению внутреннего сопротивления транзистора, что заставляет изменяться ток смещения и сдвигает рабочую точку транзистора, уменьшая его усиление. Этот процесс называется *температурной нестабильностью*.

Существует возможность компенсации температурных изменений в схеме транзисторного усилителя посредством организации отрицательной обратной связи в нем. Если часть нежелательного выходного сигнала подать на вход цепи, этот сигнал будет противодействовать изменениям в транзисторе. Такой процесс называется **отрицательной обратной связью** (рис. 28-8). В цепи, использующей отрицательную обратную связь, базовый резистор R_B соединен непосредственно с коллектором транзистора. Если температура увеличивается, то ток коллектора и падение напряжения на резисторе R_L тоже увеличиваются. Напряжение коллектор-эмиттер уменьшается, уменьшая также напряжение приложенное, к R_B . Это уменьшает ток базы, что служит причиной уменьшения тока коллектора. Таким образом действует *коллекторная цепь обратной связи*.

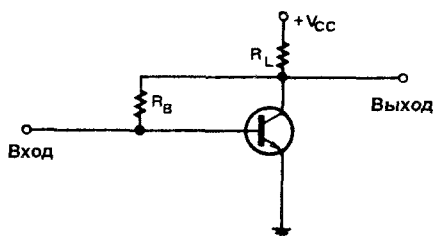


Рис. 28-8. Усилитель с общим эмиттером и коллекторной обратной связью.

На рис. 28-9 показан другой тип обратной связи. Эта цепь похожа на цепь, изображенную на рис. 28-7, за исключением того, что последовательно с выводом эмиттера включен резистор R_E . Резисторы R_B и R_E и переход транзистора эмиттер-база соединены последовательно с источником питания V_{CC} .

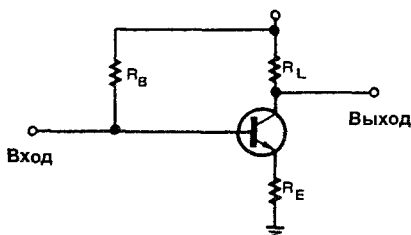


Рис. 28-9. Усилитель с общим эмиттером и эмиттерной обратной связью.

Увеличение температуры служит причиной увеличения коллекторного тока. Ток эмиттера также увеличивается, увеличивая падение напряжения на резисторе R_E и уменьшая падение напряжения на резисторе R_B . Ток базы уменьшается, что уменьшает как ток коллектора, так и ток эмиттера. Поскольку сигнал обратной связи создается на эмиттере транзистора, эта цепь называется *цепью эмиттерной обратной связи*.

В цепи этого типа происходит уменьшение общего усиления цепи, связанное с тем, что входной сигнал переменного тока появляется как на резисторе R_L , так и на резисторе R_E и на транзисторе. При подсоединении конденсатора параллельно резистору R_E (рис. 28-10), сигнал переменного тока обходит резистор R_E , так как сопротивление конден

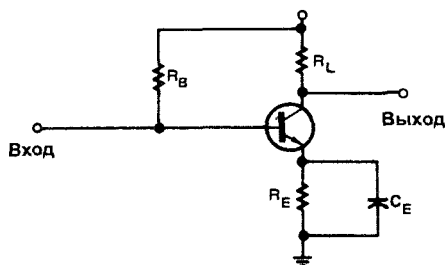


Рис. 28-10. Эмиттерная обратная связь с блокировочным конденсатором.

сатора существенно меньше R_E . Этот конденсатор часто называют *блокировочным конденсатором*.

Блокировочный конденсатор устраняет любые быстрые изменения напряжения на резисторе R_E , благодаря тому, что он обладает низким импедансом для переменного тока. Блокировочный конденсатор удерживает напряжение на резисторе R_E неизменным, в то же самое время не мешая работе цепи обратной связи, обеспечиваемой R_E .

Цепь обратной связи с делителем напряжения обеспечивает большую стабильность транзистора (рис. 28-11). Эта цепь используется наиболее широко. Резистор R_B заменяется двумя резисторами, R_1 и R_2 . Эти соединенные последовательно резисторы подключены параллельно источнику питания V_{CC} . Резисторы делят напряжение питания на два напряжения, образуя делитель напряжения.

На резисторе R_2 падает меньшее напряжение, чем на резисторе R_1 . Напряжение на базе по отношению к земле равно падению напряжения на резисторе R_2 . Цель делителя напряжения — установить постоянное напряжение на базе транзистора по отношению к земле. Ток, текущий

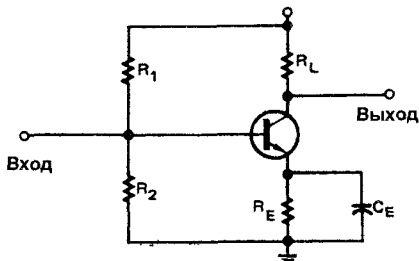


Рис. 28-11. Усилитель с общим эмиттером и обратной связью на основе делителя напряжения.



через резистор R_2 , направлен к базе. Следовательно, подсоединенный к базе конец резистора R_2 , имеет положительный потенциал по отношению к земле.

Так как через резистор R_E течет ток эмиттера, то на конце резистора R_E , подсоединенном к эмиттеру, положительный потенциал по отношению к земле. Напряжение на переходе эмиттер-база является разностью двух положительных напряжений — напряжения на резисторе R_2 и напряжения на резисторе R_E . Для того, чтобы на транзисторе имело место правильно приложенное прямое смещение, положительный потенциал базы должен быть немного выше положительного потенциала эмиттера.

При увеличении температуры токи коллектора и эмиттера также увеличиваются. Увеличение тока эмиттера приводит к увеличению падения напряжения на резисторе R_E . Это приводит к тому, что положительный потенциал эмиттера по отношению к земле увеличивается. Тогда прямое смещение перехода эмиттер-база уменьшается, что приводит к уменьшению тока базы. Уменьшение тока базы уменьшает токи коллектора и эмиттера. Противоположное также имеет место и при понижении температуры: ток базы увеличивается, что приводит к увеличению токов эмиттера и коллектора.

Усилители, обсуждавшиеся до сих пор, имели такое напряжение смещения, что выходной сигнал был таким же, как и входной сигнал в течение всего периода, только величина его была больше. Усилитель, смещение которого такое, что ток через него течет и усиливается во время всего периода сигнала, называется **усилителем, работающим в классе А** (рис. 28-12).

Усилитель, смещение которого таково, что выходной ток через него течет и усиливается в течение времени меньшем, чем полный период, но большем половины периода, называется **усилителем, работающим в классе АВ** (рис. 28-13).

Усилитель, смещение которого такое, что выходной ток через него течет только половину периода входного сигнала — это **усилитель, работающий в классе В**. Только во вре-

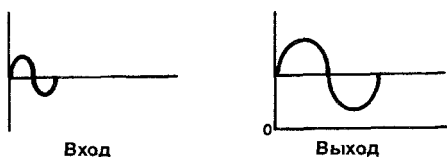


Рис. 28-12. Выходное напряжение усилителя класса А.

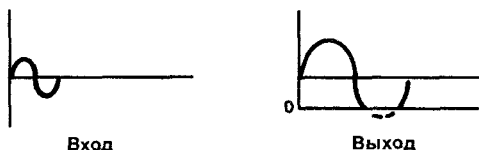


Рис. 28-13. Выходное напряжение усилителя класса АВ.

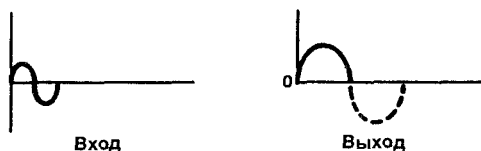


Рис. 28-14. Выходное напряжение усилителя класса В.

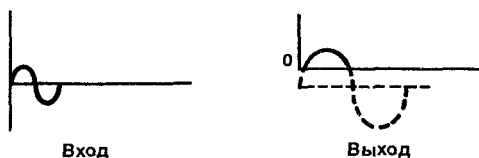


Рис. 28-15. Выходное напряжение усилителя класса С.

мя половины периода входной сигнал переменного тока усиливается в режиме класса В (рис. 28-14).

Усилитель, смещение которого такое, что выходной ток через него течет меньше, чем половину периода входного сигнала переменного тока — это **усилитель, работающий в классе С**. Меньше, чем половина периода входного сигнала усиливается в режиме класса С (рис. 28-15).

Усилители класса А создают наименьшие искажения и называются линейными. Они также имеют самую низкую выходную мощность и наименее эффективны. Усилители класса А находят широкое применение в тех случаях, когда требуется точное сохранение входного сигнала, как, например, при усилении сигналов звуковой частоты в радиоприемниках и телевизорах. Однако из-за высоких требований по мощности, транзисторы обычно работают в режиме класса АВ или класса В.



Усилители классов АВ, В и С вносят значительные искажения. Это обусловлено тем, что они усиливают только часть входного сигнала. Для усиления полного входного сигнала переменного тока необходимы два транзистора, соединенные в двухтактную схему (рис. 28-16). Усилители класса В используются в качестве выходных каскадов в стереосистемах и мощных концертных усилителях, а также в промышленности. Усилители класса С используются в качестве усилителей высокой мощности в передатчиках, где необходимо усиление только одной частоты, например в радио и телевизионных передатчиках.

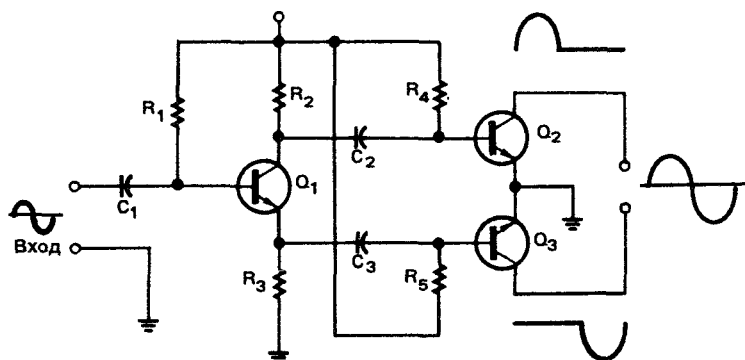


Рис. 28-16. Схема двухтактного усилителя.

28-2. Вопросы

1. Нарисуйте схему транзисторного усилителя с общим эмиттером, использующего один источник питания.
2. Как компенсируются изменения температуры в транзисторном усилителе?
3. Нарисуйте схему цепи обратной связи с делителем напряжения.
4. Перечислите классы усилителей и укажите их выходные мощности.
5. Перечислите применения усилителей каждого класса.



28-3. СОЕДИНЕНИЕ УСИЛИТЕЛЕЙ

Для получения большого усиления, транзисторные усилители могут быть соединены вместе. Однако для избежания влияния смещения одного усилителя на работу другого, они должны **соединяться** специальным образом. Используемый метод соединения усилителей не должен нарушать работу какой-либо цепи. Возможны следующие методы соединения усилителей: посредством резистивно-емкостной, импедансной, трансформаторной и непосредственной (гальванической) связей.

Резистивно-емкостная связь или RC связь состоит из двух резисторов и конденсатора, соединенных как показано на рис. 28-17. Резистор R_3 является коллекторной нагрузкой первого каскада. Конденсатор C_1 является блокирующим для постоянного тока и конденсатором связи для переменного тока. Резистор R_4 является входной нагрузкой, а также замыкает по постоянному току цепь перехода база-эмиттер второго каскада. Резистивно-емкостная связь используется, главным образом, в усилителях низкой частоты.

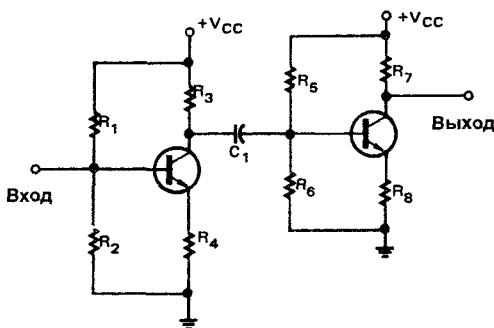


Рис. 28-17. RC связь.

Конденсатор связи C_1 должен иметь низкое реактивное сопротивление для минимизации ослабления сигнала на низких частотах. Обычно используется емкость в пределах от 10 до 100 микрофард. Конденсатор связи обычно бывает электролитическим.



Реактивное сопротивление конденсатора связи увеличивается при уменьшении частоты. Низкочастотная граница определяется величиной емкости конденсатора связи. Высокочастотная граница определяется типом использованного транзистора.

Импедансная связь подобна RC связи, только вместо резистора в качестве нагрузки коллектора первого каскада усиления используется катушка индуктивности (рис. 28-18).

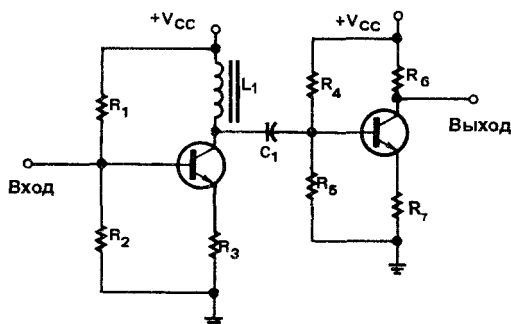


Рис. 28-18. Импедансная связь.

Импедансная связь работает совершенно аналогично RC связи. Ее преимуществом является то, что катушка индуктивности имеет очень низкое сопротивление постоянному току. Выходной сигнал переменного тока на катушке индуктивности такой же, как и на нагрузочном резисторе. Однако катушка индуктивности потребляет меньшую мощность, чем резистор, что увеличивает общую эффективность цепи.

Недостатком импедансной связи является то, что индуктивное сопротивление увеличивается при увеличении частоты. Поэтому коэффициент усиления по напряжению изменяется при изменении частоты. Этот тип связи идеален для одночастотного усиления, то есть при усилении очень узкой полосы частот.

В цепи с *трансформаторной связью* два усилительных каскада связаны между собой через трансформатор (рис. 28-19). Трансформатор может эффективно согласовать высокоимпедансный источник с низкоимпедансной нагрузкой. Недостатком этого метода является то, что трансформаторы громоздки и дороги. Кроме того, как и усилитель с импе-

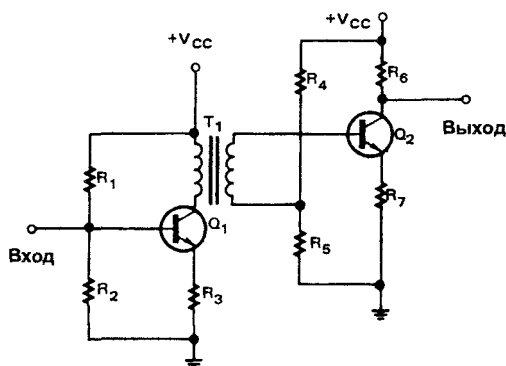


Рис. 28-19. Трансформаторная связь.

данной связью, усилитель с трансформаторной связью может использоваться только в узком диапазоне частот.

Когда необходимо усилить очень низкие частоты или сигнал постоянного тока, следует использовать *усилитель с непосредственной* (гальванической) *связью* (рис. 28-20). Усилители с гальванической связью обеспечивают равномерное усиление по току и напряжению в широком диапазоне частот. Усилители этого типа могут усиливать частоты от нуля герц (постоянный ток) до многих тысяч герц. Однако усилители с гальванической связью преимущественно применяются на низких частотах.

Недостатком усилителей с гальванической связью является то, что они нестабильны. Любые изменения выходного тока первого каскада усиливаются вторым каскадом. Это происходит потому, что смещение второго каскада непосредственно связано с первым каскадом. Для повышения

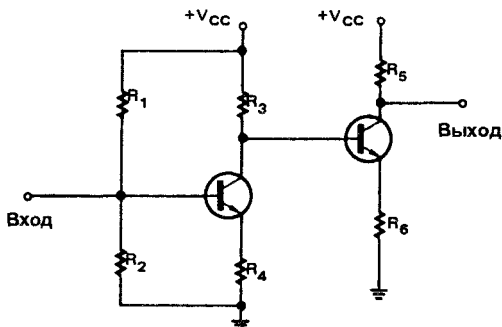


Рис. 28-20. Гальваническая связь.



стабильности требуется использование дорогих прецизионных компонентов.

28-3. Вопросы

1. Каковы четыре основных метода соединения транзисторных усилителей?
2. Где, в основном, используется резистивно-емкостная связь?
3. В чем разница между резистивно-емкостной связью и импедансной связью?
4. В чем недостаток трансформаторной связи?
5. Какой метод связи используется при усилении низкочастотных сигналов и сигналов постоянного тока?

28-4. УСИЛИТЕЛИ С ГАЛЬВАНИЧЕСКОЙ СВЯЗЬЮ

Усилители с гальванической связью или усилители постоянного тока используются для усиления низкочастотных сигналов или для усиления сигналов постоянного тока. Усилитель постоянного тока также используется для устранения индуктивных потерь в цепях связи. Усилители постоянного тока применяются в компьютерах, измерительном и тестирующем оборудовании и в промышленной аппаратуре для управления производственными процессами.

Простейший усилитель постоянного тока изображен на рис. 28-21. Чаще всего используется усилитель с общим эмиттером. Изображенная схема содержит цепь смещения на основе делителя напряжения и эмиттерную цепь обратной связи. В цепях этого типа не используется конденсатор связи. Входной сигнал подается прямо на базу транзистора. Выходной сигнал снимается с коллектора.

Усилитель постоянного тока может обеспечивать усиление как по току, так и по напряжению. Однако, он применяется, главным образом, в качестве усилителя напряжения. Усиление по напряжению одинаково для сигналов постоянного и переменного токов.

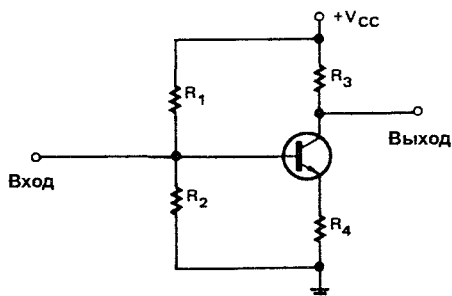


Рис. 28-21. Простой усилитель постоянного тока.

В большинстве случаев одного каскада усиления недостаточно. Для получения более высокого усиления требуются два или более каскадов. Соединенные вместе два или более каскадов называются *многокаскадным усилителем*. На рис. 28-22 изображен двухкаскадный усилитель. Входной сигнал усиливается первым каскадом. После этого усиленный сигнал поступает на базу транзистора второго каскада. Общее усиление цепи равно произведению коэффициентов усиления по напряжению двух каскадов. Например, если и первый, и второй каскады имеют коэффициент усиления по напряжению равный 10, то общий коэффициент усиления цепи равен 100.

На рис. 28-23 изображен усилитель постоянного тока другого типа. В нем используются транзисторы типов *p-n-p* и *p-n-p*. Цепь такого типа называется *комплементарным усилителем*. Функции этой цепи такие же, как и у цепи, изображенной на рис. 28-22. Разница только в том, что

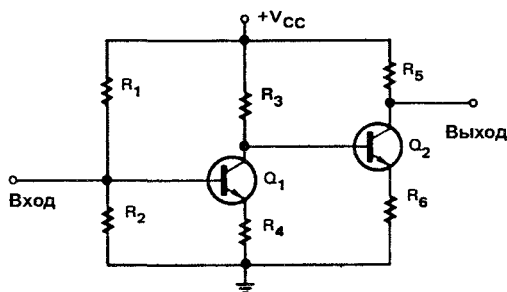


Рис. 28-22. Двухкаскадный усилитель постоянного тока.

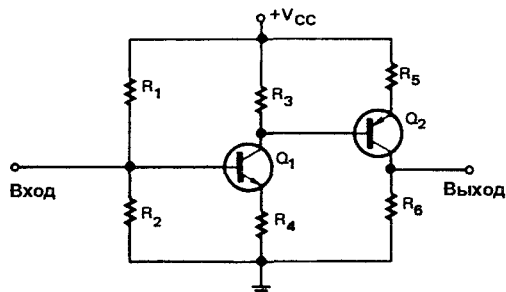


Рис. 28-23. Комплементарный усилитель постоянного тока.

транзистор второго каскада р-п-р типа. р-п-р транзистор, перевернут, так что на эмиттер и коллектор подается напряжение смещения правильно.

На рис. 28-24 изображены два соединенных вместе транзистора, работающих, как одно целое. Эта цепь называется *схемой Дарлингтона*. Транзистор Q_1 используется для управления проводимостью транзистора Q_2 . Входной сигнал, поданный на базу транзистора Q_1 , управляет током базы транзистора Q_2 . Схема Дарлингтона может быть изготовлена в одном корпусе с тремя выводами: эмиттер (Э), база (Б) и коллектор (К). Она используется как простой усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления по напряжению.

Основным недостатком многокаскадных усилителей является их высокая температурная нестабильность. В цепях, требующих три или четыре каскада усиления постоянного тока, окончательный каскад может не усиливать исходный сигнал постоянного или переменного тока, так как

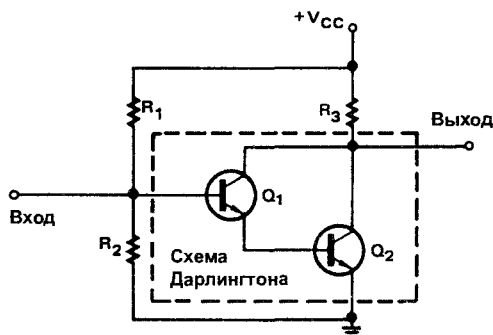


Рис. 28-24. Схема Дарлингтона.

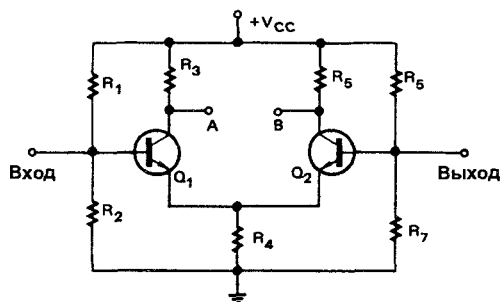


Рис. 28-25. Дифференциальный усилитель.

он будет сильно искажен. Та же самая проблема существует и со схемой Дарлингтона.

В случаях, когда требуется и высокий коэффициент усиления, и высокая температурная стабильность, необходим усилитель другого типа. Это — **дифференциальный усилитель** (рис. 28-25). Его особенность в том, что он имеет два отдельных входа и может обеспечить либо один, либо два выходных сигнала. Если сигнал подан на вход транзистора Q_1 , усиленный сигнал появится между выходом А и землей, как в обычном усилителе. Однако малый сигнал появится также на резисторе R_4 и на эмиттере транзистора Q_2 . Транзистор Q_2 работает, как усилитель с общей базой. Усиленный выходной сигнал появится между выходом В и землей. Выходной сигнал с выхода В сдвинут по фазе на 180 градусов по отношению к сигналу на выходе А. Это делает дифференциальный усилитель более универсальным, чем обычный.

Обычно дифференциальный усилитель не используется для получения выходного напряжения между одним из выходов и землей. Выходной сигнал получают между выходом А и выходом В. Поскольку два выходных сигнала сдвинуты относительно друг друга на 180 градусов по фазе, то между этими точками существует значительное выходное напряжение. Входной сигнал может быть подан на любой вход.

Дифференциальный усилитель обладает высокой температурной стабильностью, так как транзисторы Q_1 и Q_2 расположены близко друг к другу и испытывают одинаковое



влияние температуры. Кроме того, коллекторные токи транзисторов Q_1 и Q_2 испытывают одинаковые тенденции к увеличению и уменьшению, так что выходное напряжение остается постоянным.

Дифференциальный усилитель широко используется в интегральных микросхемах и в электронном оборудовании. Он используется для усиления и(или) сравнения амплитуд сигналов как постоянного, так и переменного токов. Дифференциальные усилители можно соединять последовательно для получения более высокого усиления. В некоторых случаях дифференциальный усилитель используется в качестве первого каскада в многокаскадных обычных усилителях. Дифференциальные усилители, благодаря их универсальности и температурной стабильности, являются наиболее важным типом усилителей с гальванической связью.

28-4. Вопросы

1. В каких случаях используют усилители с гальванической связью?
2. Какую конфигурацию усилителя обычно используют в усилителях с гальванической связью?
3. Нарисуйте схемы следующих цепей:
 - а. Комплементарный усилитель.
 - б. Схему Дарлингтона.
 - в. Дифференциальный усилитель.
4. Как дифференциальный усилитель отличить от обычного?
5. Где, в основном, используются дифференциальные усилители?

28-5. УСИЛИТЕЛИ ЗВУКОВОЙ ЧАСТОТЫ

Усилители звуковой частоты усиливают сигналы переменного тока в диапазоне частот примерно от 20 до 20000 герц. Они могут усиливать весь диапазон звуковых частот или только небольшую часть его.

Усилители звуковой частоты делятся на две категории: **усилители напряжения** и **усилители мощности**. *Усилите*



ли напряжения применяются, главным образом, для получения высокого усиления по напряжению. *Усилители мощности* используются для передачи большой мощности в нагрузку. Например, усилитель напряжения применяется, главным образом, для повышения напряжения выходного сигнала до уровня, достаточного для раскачки усилителя мощности. После этого используется усилитель мощности для получения высокой мощности, необходимой для передачи сигнала на усилительные колонки или другое устройство высокой мощности. Обычно усилители напряжения работают как усилители класса А, а усилители мощности — как усилители класса В.

На рис. 28-26 изображен простой усилитель напряжения. Изображенная цепь является цепью с общим эмиттером. Смещение транзистора выбрано для работы в классе А, чтобы обеспечить минимальные искажения. Усилитель может обеспечить заметное усиление по напряжению в широком диапазоне частот. Наличие конденсатора связи не позволяет цепи усиливать сигнал постоянного тока.

Два или более усилителя напряжения могут быть соединены последовательно для получения большего усиления. Каскады могут быть соединены с помощью RC связи или трансформаторной связи. Трансформаторная связь более эффективна. Трансформатор используется для согласования входного и выходного импеданса двух каскадов. Это предохраняет второй каскад от перегрузки первым каскадом. Перегрузка возникает, когда устройство создает большую нагрузку и сильно влияет на выход, потребляя слишком

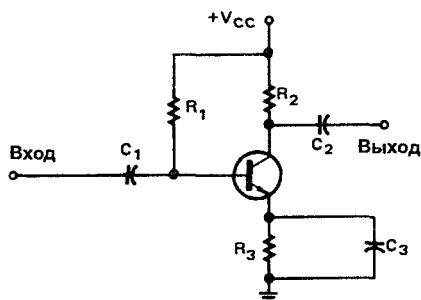


Рис. 28-26. Усилитель напряжения



большой ток. Трансформатор, используемый для связи двух каскадов, называется межкаскадным трансформатором.

Когда достаточный уровень выходного напряжения достигнут, используется усилитель мощности для раскачки нагрузки. Усилители мощности рассчитаны для раскачки определенных нагрузок и характеризуются мощностью в ваттах. Обычно сопротивление нагрузки лежит в пределах от 4 до 16 Ом.

На рис. 28-27 изображена схема усилителя мощности на двух транзисторах, которая называется *двухтактной*. Верхняя половина цепи является зеркальным отображением нижней. Каждая половина представляет собой усилитель на одном транзисторе. Выходное напряжение снимается с первичной обмотки трансформатора в течение чередующихся полупериодов входного сигнала. Оба транзистора работают как усилители класса АВ или В. Вход двухтактного усилителя требует сдвинутых по фазе на 180° входных сигналов. Это означает, что один сигнал должен быть инвертирован по отношению к другому. Однако оба сигнала должны иметь одинаковую амплитуду и частоту. Цепь, создающая такой фазовый сдвиг сигнала, называется *фазовращателем*. Фазовращатель на одном транзисторе изображен на рис. 28-28. Выходы взяты с коллектора и эмиттера транзистора. Фазовращатель работает, как усилитель класса А, обеспечивая наименьшие искажения выходного сигнала. Конденсаторы связи необходимы для компен-

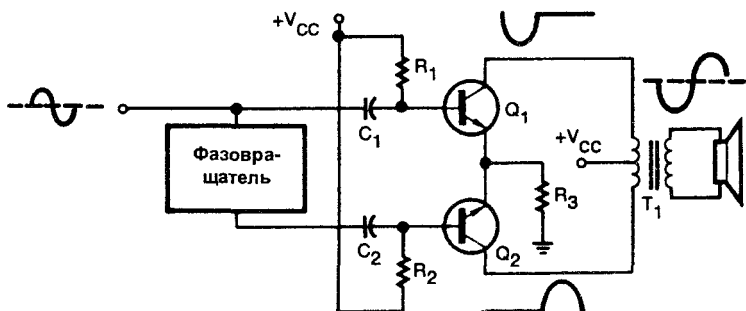


Рис. 28-27. Двухтактный усилитель мощности.

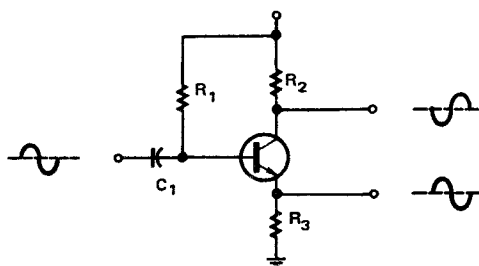


Рис. 28-28. Фазовращатель.

сацией разницы между коллекторным и эмиттерным напряжениями постоянного тока.

Двухтактный усилитель, не требующий фазовращателя, называется *комплементарным двухтактным усилителем*. Для работы двухтактного каскада в нем используются транзисторы *n-p-n* и *p-n-p* (рис. 28-29). Два транзистора соединены последовательно, эмиттерами друг к другу. Когда на каждый транзистор подается напряжение смещения в прямом направлении, между его базой и эмиттером возникает напряжение 0,7 вольт или 1,4 вольт между двумя базами. Два диода помогают поддерживать разность потенциалов 1,4 вольт постоянной. Выходное напряжение берется из точки соединения эмиттеров через конденсатор связи.

Для усилителей мощностью более 10 ватт, трудно и дорого подобрать пару *n-p-n* и *p-n-p* транзисторов с одинаковыми характеристиками. На рис. 28-30 изображена цепь, использующая два *p-n-p* транзистора в качестве мощного выходного транзистора. Мощные транзисторы раскачиваются двумя транзисторами *n-p-n* и *p-n-p* меньшей мощности. Верхний набор транзисторов образует схему Дарлингтона.

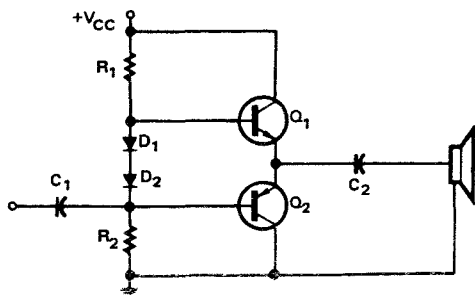


Рис. 28-29. Комплементарный двухтактный усилитель мощности.

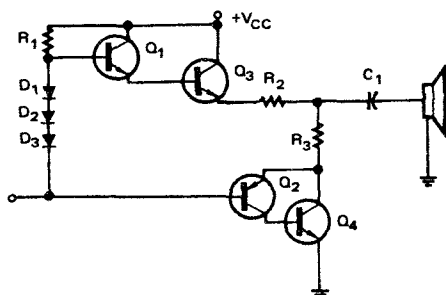


Рис. 28-30. Квазикомплементарный усилитель мощности.

Нижний набор транзисторов использует транзисторы $n-p-n$ и $p-n-p$. Работая как одно устройство, они соответствуют $p-n-p$ транзистору. Усилитель этого типа называется квазикомплементарным усилителем. Он работает так же, как и комплементарный усилитель, но не требует комплементарных выходных транзисторов высокой мощности.

Так как усилители мощности развивают высокую мощность, некоторые его детали сильно нагреваются. Для отвода накопленного тепла используются радиаторы. Радиатор — это устройство, имеющее большую площадь, которая может излучать тепло. На рис. 28-31 изображены различные типы радиаторов для транзисторов.



Рис. 28-31. Типы радиаторов

28-5. Вопросы

1. В каком диапазоне частот используются усилители звуковой частоты?



2. Каковы два типа усилителей звуковой частоты?
3. Что такое межкаскадный трансформатор?
4. Нарисуйте схемы следующих устройств:
 - а. Двухтактного усилителя.
 - б. Комплементарного двухтактного усилителя.
 - в. Квазикомплементарного двухтактного усилителя.

28-6. ВИДЕОУСИЛИТЕЛИ

Видеоусилители — это широкополосные усилители, используемые для усиления видеоинформации. Диапазон частот видеоусилителя значительно шире, чем диапазон частот усилителя звуковой частоты. Он занимает полосу частот от нескольких герц до 5 или 6 мегагерц. Например, для передачи телевизионного сигнала требуется полоса частот от 60 герц до 4 мегагерц. Радиолокаторы используют полосу частот от 30 герц до 2 мегагерц. В цепях, использующих пилообразное или импульсное напряжение, необходим частотный диапазон от одной десятой наименьшей частоты сигнала до десятикратно увеличенной наибольшей частоты. Такой широкий диапазон частот необходим потому, что несинусоидальное напряжение содержит в своем составе много гармоник и все они должны быть одинаково усилены.

Так как видеоусилители должны иметь однородную амплитудно-частотную характеристику, в них используется только гальваническая или RC связь между каскадами. Гальваническая связь обеспечивает наилучшую амплитудно-частотную характеристику, тогда как RC связь имеет экономические преимущества. Усилитель с RC связями имеет плоскую амплитудно-частотную характеристику в области средних частот диапазона, подходящую для видеоусилителей. *Плоская амплитудно-частотная характеристика* — это термин, показывающий, что усиление усилителя только незначительно меняется в пределах заданного частотного диапазона. Амплитудно-частотная характеристика такого усилителя представляет собой почти прямую линию; отсюда и термин — плоская амплитудно-частотная характеристика.



Фактор, ограничивающий усиление транзисторного усилителя на высоких частотах — это шунтирование транзистора паразитной емкостью цепи. Между переходами транзистора существует небольшая емкость, ее величина определяется размером перехода и расстоянием между выводами транзистора, а также смещением, приложенным к переходу. Переход база-эмиттер, смещенный в прямом направлении имеет большую емкость, чем переход коллектор-база, смещенный в обратном направлении.

Для того, чтобы уменьшить влияние шунтирующей емкости и увеличить усиление на высоких частотах, в транзисторных видеоусилителях используются корректирующие катушки индуктивности. На рис. 28-32 изображен метод *параллельной коррекции*. Небольшая индуктивность включается последовательно с резистором нагрузки. В диапазоне низких и средних частот корректирующая индуктивность почти не влияет на амплитудно-частотную характеристику. На высоких частотах катушка индуктивности резонирует с емкостью цепи, что приводит к увеличению выходного импеданса и поднимает усиление.

Другим методом является включение небольшой индуктивности последовательно с конденсатором межкаскадной связи. Этот метод называется *последовательной коррекцией* (рис. 28-33). Корректирующая индуктивность эффективно отделяет входные и выходные емкости двух каскадов.

Часто параллельная и последовательная коррекции комбинируются для того, чтобы усилить преимущества обоих методов (рис. 28-34). Это комбинирование может расширить полосу пропускания усилителя до частот, превышающих 5 мегагерц.

Чаще всего видеоусилители используются в телевизионных приемниках (рис. 28-35). Транзистор Q_1 включен,

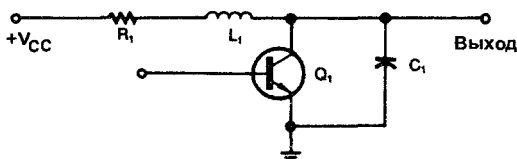


Рис. 28-32. Параллельная коррекция.

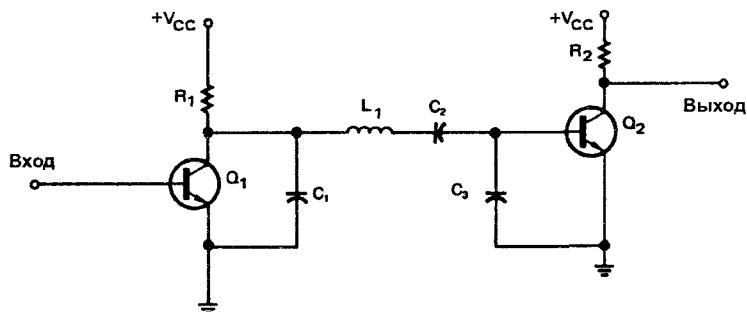


Рис. 28-33. Последовательная коррекция.

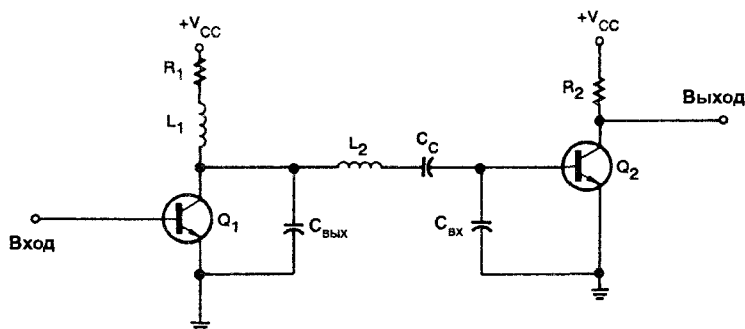


Рис. 28-34. Последовательно-параллельная коррекция.

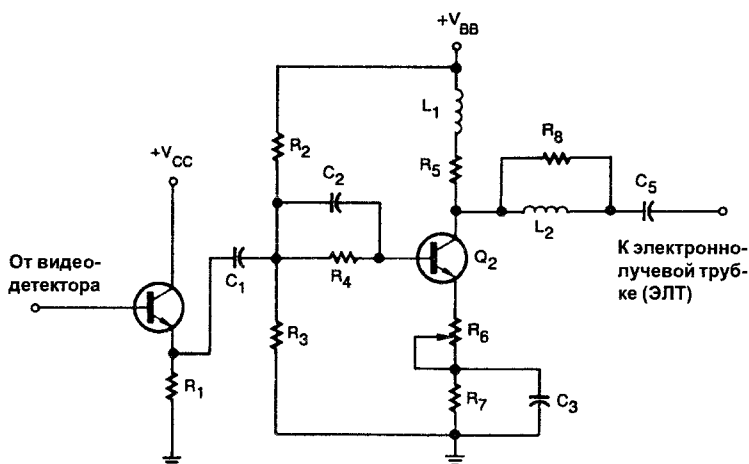


Рис. 28-35. Видеоусилитель телевизионного приемника.



как эмиттерный повторитель. Сигнал на транзистор Q_1 подается с видеодетектора. Видеодетектор получает видеосигнал с усилителя промежуточной частоты. В цепи коллектора Q_2 транзистора включена параллельная корректирующая индуктивность (L_1). На пути выходного сигнала включена последовательная корректирующая индуктивность (L_2). После этого видеосигнал подается на электронно-лучевую трубку через конденсатор связи C_5 .

28-6. Вопросы

1. Что такое видеоусилитель?
2. Каков диапазон частот видеоусилителя?
3. Какими способами соединяются каскады видеоусилителей?
4. Дайте определения следующих понятий:
 - а. Параллельная коррекция.
 - б. Последовательная коррекция.
5. Где используются видеоусилители?

28-7. УСИЛИТЕЛИ РАДИОЧАСТОТЫ И ПРОМЕЖУТОЧНОЙ ЧАСТОТЫ

Усилители радиочастоты похожи на другие усилители. Они отличаются, главным образом, диапазоном рабочих частот, занимающим область от 10 до 30 мегагерц. Существуют два класса усилителей радиочастоты: перестраиваемые и неперестраиваемые. Основной функцией *неперестраиваемого усилителя* является усиление, а его амплитудно-частотная характеристика должна занимать как можно более широкий диапазон радиочастот. В *перестраиваемом усилителе* высокое усиление должно достигаться в узкой области частот или на отдельной частоте. Обычно, когда говорят об усилителях радиочастоты, подразумевают, что они являются перестраиваемыми, если не оговорено другое.

В радиоприемных устройствах усилители радиочастоты служат для усиления сигнала и выделения сигнала,



соответствующей частоты. В передающих устройствах усилители радиочастоты служат для усиления сигнала на определенной частоте перед его подачей в антенну. В основном, приемные усилители радиочастоты являются усилителями напряжения, а передающие усилители радиочастоты являются усилителями мощности.

В приемных цепях усилитель радиочастоты должен обеспечивать достаточное усиление приемного сигнала, обладать низким собственным шумом, обеспечивать хорошую избирательность и иметь плоскую амплитудно-частотную характеристику на выбранных частотах.

На рис. 28-36 изображен усилитель радиочастоты, используемый в радиоприемнике с амплитудной модуляцией. Конденсаторы C_1 и C_4 настраивают антенну и выходной трансформатор T_1 на одну и ту же частоту. Входной сигнал с помощью индуктивной связи подается на базу транзистора Q_1 . Транзистор Q_1 работает, как усилитель класса А. Конденсатор C_4 и трансформатор T_1 обеспечивают высокое усиление по напряжению на резонансной частоте для цепи коллекторной нагрузки. Трансформатор T_1 имеет отвод для обеспечения хорошего согласования импедансов с транзистором.

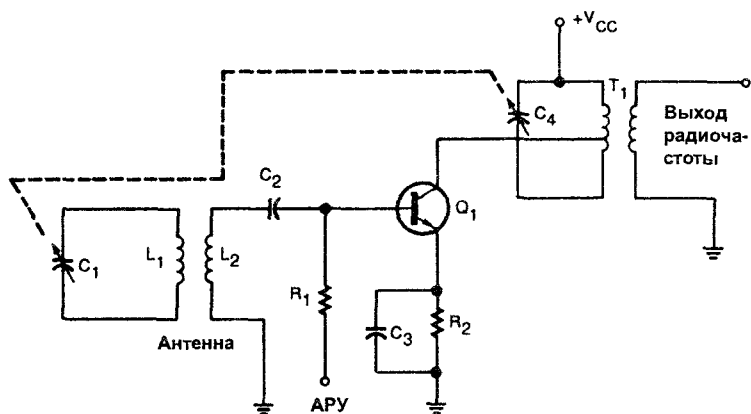


Рис. 28-36. Усилитель радиочастоты в радиоприемнике сигналов с амплитудной модуляцией.

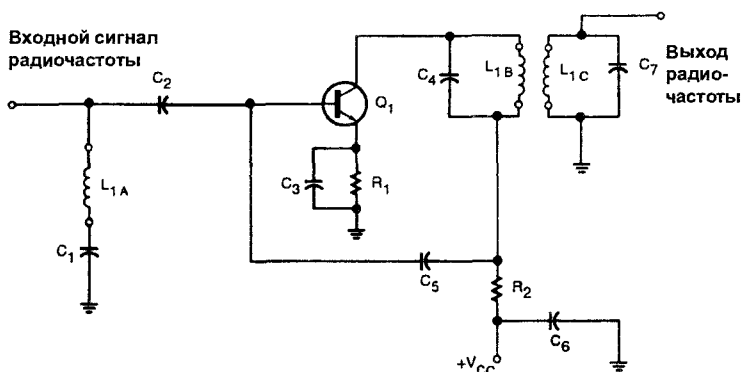


Рис. 28-37. Усилитель радиочастоты в телевизионном высокочастотном тюнере.

На рис. 28-37 изображен усилитель радиочастоты, используемый в телевизионном высокочастотном тюнере. Цепь настраивается катушками индуктивности L_{1A} , L_{1B} и L_{1C} . При повороте ручки переключателя каналов в цепь включается новый набор катушек. Это обеспечивает усиление в необходимой полосе частот для каждого канала. Входной сигнал попадает в перестраиваемую цепь, состоящую из L_{1A} , C_1 и C_2 . Транзистор Q_1 работает, как усилитель класса А. Выходная коллекторная цепь представляет собой двойной перестраиваемый трансформатор. Катушка L_{1B} настраивается конденсатором C_4 , а катушка — L_{1C} конденсатором C_7 . Резистор R_2 и конденсатор C_6 образуют развязывающий фильтр, предотвращающий попадание радиочастот в блок питания и их взаимодействие с другими цепями.

В радиоприемниках с амплитудной модуляцией входной радиосигнал преобразуется в **сигнал постоянной промежуточной частоты**. После этого используется усилитель промежуточной частоты с фиксированной настройкой для увеличения уровня сигнала до необходимой величины. Усилитель промежуточной частоты — это одночастотный (узкополосный) усилитель. Обычно для усиления сигнала до необходимого уровня используются два или три каска-

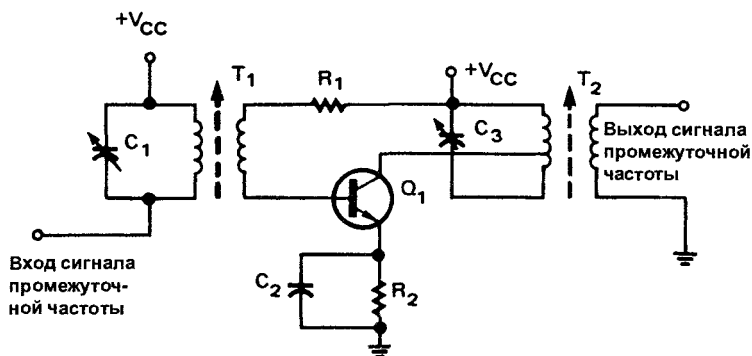


Рис. 28-38. Усилитель промежуточной частоты в радиоприемнике сигналов с амплитудной модуляцией.

да усиления промежуточной частоты. Чувствительность приемника определяется усилением усилителя промежуточной частоты. Чем выше усиление, тем выше чувствительность. На рис. 28-38 показан типичный усилитель промежуточной частоты радиоприемника амплитудно-модулированных сигналов. Промежуточная частота равна 455000 герц. На рис. 28-39 изображен усилитель промежуточной частоты телевизионного приемника. На рис. 28-40 приведена таблица, в которой сравниваются частоты радио и телевизионных приемников.

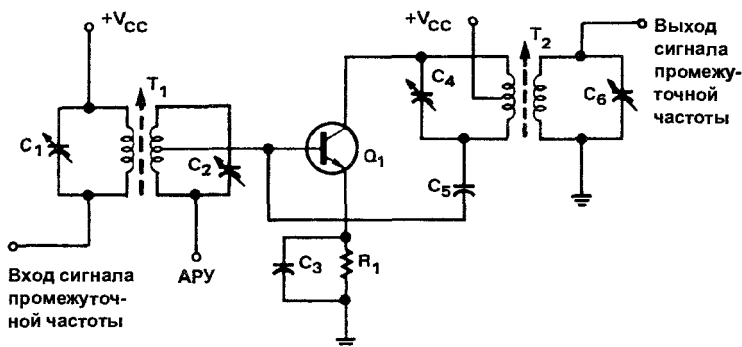


Рис. 28-39. Усилитель промежуточной частоты в телевизионном приемнике.



Тип	Принимаемая частота	Общепринятая промежуточная частота	Ширина полосы
Радио с амплитудной модуляцией	535–1605 кГц	455 кГц	10 кГц
Радио с частотной модуляцией	88–108 МГц	10,7 МГц	150 кГц
Телевидение			
Каналы 2—6	54–88 МГц	41–47 МГц	6 МГц
Каналы 7—13	174–216 МГц		
Каналы 14—83	470–890 МГц		

Рис. 28-40. Сравнение радио и телевизионных частот.

28-7. Вопросы

1. Чем усилители радиочастоты отличаются от других усилителей?
2. Какие два типа усилителей радиочастоты вы знаете?
3. Где используются усилители радиочастоты?
4. Что такое усилитель промежуточной частоты?
5. Что самое главное в усилителе промежуточной частоты?

28-8. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционный усилитель — это усилитель постоянного тока с очень высоким усилением. Обычно операционные усилители имеют коэффициент усиления от 20 000 до 1 000 000. На рис. 28-41 изображено схематическое обозначение операционного усилителя. Вход, помеченный знаком (–), называется *инвертирующим входом*, а вход, помеченный знаком (+) — *неинвертирующим входом*.

На рис. 28-42 изображена блок-схема операционного усилителя. Операционный усилитель состоит из трех каскадов. Каждый каскад является усилителем со своими характерными особенностями.

Входной каскад — это дифференциальный усилитель. Он позволяет операционному усилителю реагировать толь-

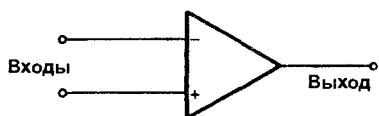


Рис. 28-41. Схематическое обозначение операционного усилителя.

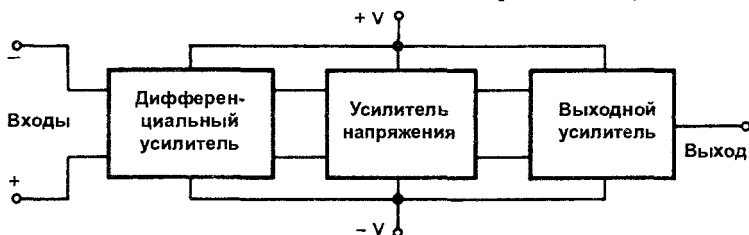


Рис. 28-42. Блок-схема операционного усилителя.

ко на разность входных сигналов. Кроме того, дифференциальный усилитель усиливает сигнал, пропорциональный разности входных напряжений, и не реагирует на одинаковые сигналы на обоих входах. Это называется *ослаблением синфазного сигнала*. Ослабление синфазного сигнала полезно при измерении слабых сигналов на фоне шума с частотой 60 герц. Шум с частотой 60 герц является общим для обоих входов и поэтому он ослабляется, а операционный усилитель усиливает только малую разность сигналов на обоих входах. Амплитудно-частотная характеристика дифференциального усилителя обеспечивает усиление от области низких частот до постоянного тока. Это означает, что дифференциальный усилитель может усиливать не только низкочастотные сигналы переменного тока, но и сигналы постоянного тока.

Второй каскад — это усилитель напряжения с высоким коэффициентом усиления. Этот каскад состоит из нескольких пар транзисторов, соединенных по схеме Дарлингтона, достигает усиления по напряжению в 200000 раз и более, обеспечивая большую часть усиления операционного усилителя.

Последний каскад — это выходной усилитель. Обычно это эмиттерный повторитель на комплементарных транзисторах. Он используется для того, чтобы операционный усилитель имел низкий выходной импеданс. Операционный



усилитель может обеспечить несколько миллиампер тока нагрузки.

Операционные усилители рассчитаны на питание от двухполярного источника напряжения от ± 5 до ± 15 вольт. Положительный вывод источника питания должен обеспечивать от $+5$ до $+15$ вольт по отношению к земле, а отрицательный от -5 до -15 вольт по отношению к земле. Это позволяет выходному напряжению изменяться в сторону положительных и отрицательных значений по отношению к земле. Однако в некоторых случаях операционные усилители могут работать и от однополярного источника питания.

Принципиальная схема типичного операционного усилителя изображена на рис. 28-43. Изображенный усилитель называется LM741 (отечественный аналог К140УД7). Этот операционный усилитель не требует частотной коррекции, защищен от короткого замыкания, не имеет проблем с запирающим. Хорошие эксплуатационные качества при низкой цене обеспечивают его широкое использование. Устройство, содержащее в одном корпусе два операционных усилителя LM741, называется LM747 (наш аналог КР140УД20). Благодаря отсутствию конденсаторов связи эти операционные усилители могут усиливать сигналы переменного и постоянного токов.

Нормальный режим работы операционного усилителя — это режим работы с обратной связью. В нем используется **отрицательная обратная связь**, что уменьшает общее усиление операционного усилителя, но обеспечивает лучшую стабильность.

При работе операционного усилителя с обратной связью, выходной сигнал подается на один из входов в качестве сигнала обратной связи. Этот сигнал обратной связи противодействует входному сигналу, так как находится в противофазе. Существуют две основные цепи с обратной связью: инвертирующая и неинвертирующая. Инвертирующая конфигурация более популярна.

На рис. 28-44 изображен операционный усилитель с *инвертирующей обратной связью*: входной сигнал подается на



Operational Amplifiers/Buffers

LM741/LM741A/LM741C/LM741E Operational Amplifier

General Description

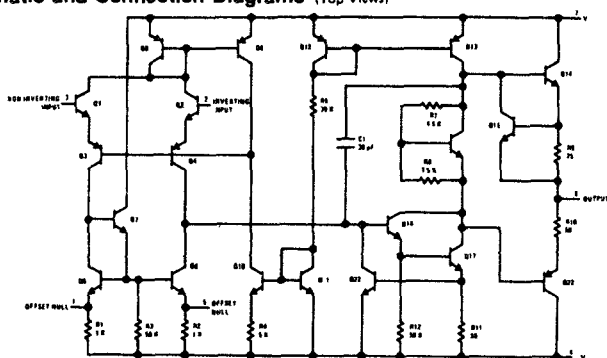
The LM741 series are general purpose operational amplifiers which feature improved performance over industry standards like the LM709. They are direct plug-in replacements for the 709C LM201 MC1439 and 748 in most applications.

The amplifiers offer many features which make their application nearly foolproof: overload pro-

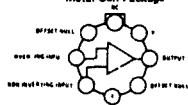
tection on the input and output; no latch up when the common mode range is exceeded as well as freedom from oscillations.

The LM741C/LM741E are identical to the LM741/LM741A except that the LM741C/LM741E have their performance guaranteed over a 0°C to $+70^{\circ}\text{C}$ temperature range instead of -55°C to $+125^{\circ}\text{C}$.

Schematic and Connection Diagrams (Top Views)

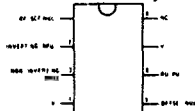


Metal Can Package



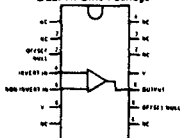
Order Number LM741H, LM741AH
LM741CH or LM741EH
See NS Package H08C

Dual In Line Package



Order Number LM741CN or LM741EN
See NS Package N08B
Order Number LM741CJ
See NS Package J08A

Dual In Line Package



Order Number LM741CN 14
See NS Package N14A
Order Number LM741J 14 LM741AJ 14
or LM741CJ 14
See NS Package J14A

Рис. 28-43. Схема операционного усилителя.



инвертирующий вход (-) через резистор R_1 . Обратная связь обеспечивается с помощью резистора R_2 . Величина сигнала на инвертирующем входе определяется как входным, так и выходным напряжением.

Знак минус указывает на то, что выходной сигнал отрицателен, когда входной сигнал положителен. Знак плюс указывает на то, что выходной сигнал положителен, когда входной сигнал отрицателен. Выходной сигнал сдвинут по фазе на 180 градусов по отношению ко входному. В зависимости от отношения резисторов R_2 и R_1 усиление инвертирующего усилителя может быть меньше, равно или больше 1. Когда усиление равно 1, его называют *усилителем с единичным усилением*, и используют для инвертирования полярности входного сигнала.

На рис. 28-45 изображен операционный *усилитель с неинвертирующей обратной связью*: выходной сигнал находится в фазе со входным. Входной сигнал подается на неинвертирующий вход операционного усилителя. Выходное напряжение делится с помощью резисторов R_2 и R_1 для того, чтобы подать напряжение обратной связи на инвертирующий (-) вход. Усиление по напряжению по неинвертирующему входу всегда больше 1.

Коэффициент усиления операционного усилителя зависит от частоты. Обычно усиление, указываемое в справоч-

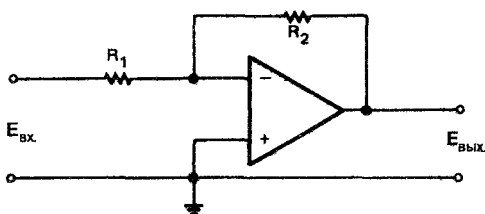
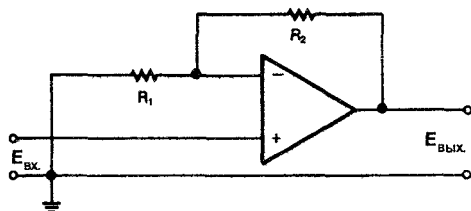


Рис. 28-44. Операционный усилитель в качестве инвертирующего усилителя.

Рис. 28-45. Операционный усилитель в качестве неинвертирующего усилителя.





ных данных — это усиление по постоянному току. При увеличении частоты усиление уменьшается. Без использования методов увеличения полосы пропускания, операционный усилитель хорош только для усиления сигналов постоянного тока. Для расширения полосы пропускания используется обратная связь, уменьшающая усиление. Насколько уменьшается усиление, настолько увеличивается полоса пропускания. С помощью этого способа полоса пропускания операционного усилителя 741 может быть увеличена до 1 мегагерца.

Операционные усилители применяются для сравнения, инвертирования или неинвертирования сигналов, они также могут использоваться для сложения сигналов, как показано на рис. 28-46. Такой усилитель называется *суммирующим усилителем*. Отрицательная обратная связь удерживает потенциал инвертирующего входа близким к потенциалу земли. Следовательно, все входные сигналы электрически изолированы друг от друга. На выходе усилителя получается инвертированная сумма входных сигналов.

В суммирующем усилителе резистор, соединяющий неинвертирующий вход с землей, выбран равным полному сопротивлению параллельно включенных входному сопротивлению и сопротивлению обратной связи. Если сопротивление обратной связи увеличить, то цепь может обеспечить и усиление. Если используются различные входные сопротивления, сигналы могут быть сложены с различным усилением.

Суммирующие усилители используются при смешивании сигналов звуковой частоты. В качестве входных сопротивлений используются потенциометры для регулирования уровня каждого из входных сигналов.

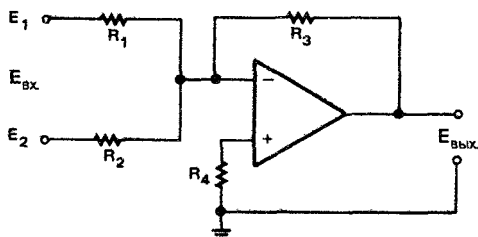


Рис. 28-46. Операционный усилитель в качестве суммирующего усилителя.



Операционные усилители также могут использоваться в качестве активных фильтров. Фильтры, использующие резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы, называются **пассивными**. **Активные** фильтры — это безындуктивные фильтры, использующие интегральные микросхемы. Преимущество активных фильтров в отсутствии катушек индуктивности, имеющих большие размеры.

При использовании операционных усилителей в качестве активных фильтров недостатком является то, что они требуют источника питания, могут создавать шум и превращаться в генератор (возбуждаться) вследствие температурного дрейфа или старения компонентов.

На рис. 28-47 изображен фильтр верхних частот, использующий операционный усилитель. Фильтр верхних частот подавляет низкие частоты и пропускает частоты, расположенные выше частоты среза. На рис. 28-48 изображен фильтр нижних частот, использующий операционный усилитель. Фильтр нижних частот пропускает низкие частоты и не пропускает частоты, расположенные выше частоты среза. На рис. 28-49 изображен полосовой фильтр, использующий операционный усилитель. Полосовой фильтр пропускает частоты, расположенные вблизи некоторой центральной частоты, и ослабляет более высокие и более низкие частоты.

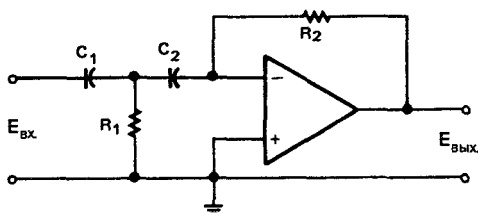
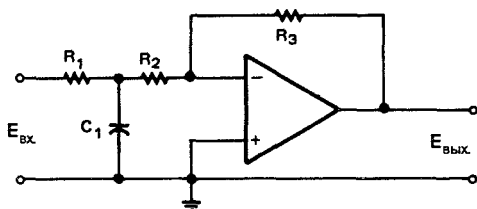


Рис. 28-47. Операционный усилитель в качестве фильтра верхних частот.

Рис. 28-48. Операционный усилитель в качестве фильтра нижних частот.



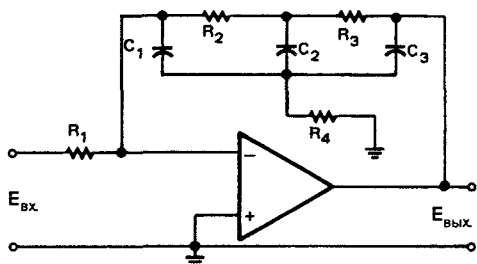
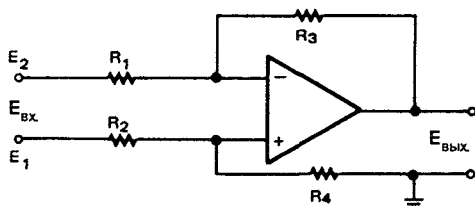


Рис. 28-49. Операционный усилитель в качестве полосового фильтра.

Рис. 28-50. Операционный усилитель в качестве разностного усилителя.



Разностный усилитель вычитает один сигнал из другого. На рис. 28-50 изображен стандартный разностный усилитель. Эта цепь называется *вычитающим устройством*, поскольку она вычитает значение E_2 из значения E_1 .

28-8. Вопросы

1. Что такое операционный усилитель?
2. Нарисуйте блок-схему операционного усилителя.
3. Кратко объясните, как работает операционный усилитель.
4. Что такое нормальный режим работы операционного усилителя?
5. Какое усиление может быть получено с помощью операционного усилителя?
6. Нарисуйте схемы следующих цепей:
 - а. Инвертирующий усилитель;
 - б. Суммирующий усилитель;
 - в. Фильтр верхних частот;
 - г. Фильтр нижних частот;
 - д. Разностный усилитель.



РЕЗЮМЕ

- Усилители — это электронные цепи, используемые для увеличения амплитуды электрического сигнала.
- Транзистор используется, главным образом, в качестве усилительного устройства.
- Транзисторные усилители могут быть трех типов: усилитель с общей базой, с общим коллектором и с общим эмиттером.
- Усилители с общим коллектором используются для согласования импедансов.
- Усилители с общим эмиттером обеспечивают обращение фазы выходного сигнала по отношению к входному.
- Все транзисторные усилители требуют двух напряжений для правильной подачи напряжения смещения.
- Один источник питания может обеспечить необходимые напряжения прямого и обратного смещения с помощью делителя напряжения.
- Цепь обратной связи с делителем напряжения является наиболее широко используемой цепью для напряжения смещения.
- Транзисторный усилитель может быть смещен таким образом, что на выходе будет усиливаться весь период входного сигнала или только его часть.
- Усилители класса А смещены таким образом, что выходной ток течет в течение всего периода.
- Усилители класса АВ смещены таким образом, что выходной ток течет в течение промежутка времени, большего, чем половина периода входного сигнала, но меньшего, чем период.
- Усилители класса В смещены таким образом, что выходной ток течет в течение только половины периода входного сигнала.
- Усилители класса С смещены таким образом, что выходной ток течет в течение промежутка меньшего половины периода входного сигнала.



- Для соединения одного транзистора с другим используют резистивно-емкостную, импедансную, трансформаторную и непосредственную (гальваническую) связи.
- Усилители с гальванической связью используются для получения высокого усиления на низких частотах или для усиления сигнала постоянного тока.
- Усилители с гальванической связью используются, главным образом, в качестве усилителей напряжения.
- Дифференциальный усилитель имеет два отдельных входа и может обеспечивать или один, или два выхода.
- Усилители звуковой частоты усиливают сигналы переменного тока в диапазоне частот от 20 до 20000 герц.
- Усилители звуковой частоты делятся на усилители напряжения и усилители мощности.
- Видеоусилители — это широкополосные усилители, используемые для усиления видеосигналов.
- Видео частоты занимают полосу от нескольких герц до 5 или 6 мегагерц.
- Усилители радиочастоты работают в диапазоне от 10 до 30 мегагерц.
- Усилители радиочастоты делятся на перестраиваемые и неперестраиваемые.
- Операционные усилители — это усилители с гальванической связью и очень высоким коэффициентом усиления.
- Операционные усилители могут иметь коэффициент усиления от 20000 до 1000000.
- Операционные усилители обычно работают в режиме обратной связи.
- Существуют два режима работы с обратной связью — инвертирующий и неинвертирующий.

Глава 28. САМОПРОВЕРКА

1. Кратко опишите, как используется транзистор для усиления сигналов.
2. Почему схема усилителя с общим эмиттером применяется наиболее широко?



3. Какие факторы влияют на усиление транзистора, и что может быть сделано для их компенсации?
4. Как поданное напряжение смещения влияет на класс работы усилителя?
5. Какой фактор необходимо учесть при соединении одного усилителя с другим?
6. Как метод связи, используемый для соединения усилителей, влияет на его рабочий диапазон частот?
7. При каких условиях могут использоваться усилители постоянного тока?
8. Как решается проблема температурной стабильности в усилителях постоянного тока с большим коэффициентом усиления?
9. В чем основные отличия между усилителями напряжения звуковой частоты и усилителями мощности звуковой частоты?
10. Каковы практические преимущества использования квазикомплементарного усилителя мощности перед комплементарным двухтактным усилителем?
11. Чем видеоусилитель отличается от усилителя звуковой частоты?
12. Какой фактор ограничивает усиление видеоусилителя на высоких частотах?
13. Для чего предназначен усилитель радиочастоты?
14. Для чего используются усилители промежуточной частоты?
15. Перечислите три каскада операционного усилителя и опишите их функции.
16. Где используются операционные усилители?

Глава 29. ГЕНЕРАТОРЫ

ЦЕЛИ:

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать генератор и его назначение.
- Перечислить основные требования к генератору.
- Объяснить, как работает колебательный контур и как он связан с генератором.
- Нарисовать блок-схему генератора.
- Знать схемы LC, RC и кварцевого генераторов синусоидальных колебаний.
- Знать схемы генераторов несинусоидальных релаксационных (затухающих) колебаний.
- Нарисовать примеры генераторов синусоидальных и несинусоидальных колебаний.

Генератор — это невращающееся устройство, вырабатывающее переменный ток. Генераторы интенсивно используются в электронике: в радиоприемниках и телевизорах, в системах связи, в компьютерах, в промышленных системах управления и в устройствах точного измерения времени. Без генераторов не существовали бы очень многие электронные устройства.

29-1. ОСНОВЫ ГЕНЕРАТОРОВ

Генератор — это электрическая цепь, генерирующая периодический сигнал переменного тока. Частота сигнала может изменяться от нескольких герц до многих миллионов герц. Электронный генератор является альтернативой механическому генератору, используемому для получения электроэнергии. Преимуществом электронного генератора является отсутствие движущихся частей и значительно большая ширина диапазона, в котором может генерироваться сигнал. Выходное напряжение генератора может



быть синусоидальным, прямоугольным или пилообразным, в зависимости от типа генератора. Основным требованием к генератору является постоянство частоты и амплитуды генерируемого напряжения.

Когда катушку индуктивности и конденсатор соединяют параллельно, они образуют цепь, называемую **колебательным контуром**. При возбуждении колебательного контура внешним источником постоянного тока, в нем возникают колебания; это означает, что в нем начинает течь переменный ток. Вследствие большого сопротивления цепи, колебания в колебательном контуре могут не возникнуть, так как сопротивление колебательного контура поглощает энергию тока и колебания в цепи затухают.

Для поддержания колебаний в колебательном контуре рассеянную энергию необходимо восполнить. Это восполнение энергии осуществляется с помощью **положительной обратной связи**. Положительная обратная связь — это подача в колебательный контур части выходного сигнала для поддержки колебаний. Сигнал обратной связи должен быть в фазе с сигналом в колебательном контуре.

На рис. 29-1 изображена блок-схема генератора. Структурное устройство генератора можно разбить на три части. Частотоподающей цепью генератора обычно является LC колебательный контур. Усилитель увеличивает амплитуду выходного сигнала колебательного контура. Цепь обратной связи подает необходимое количество энергии в колебательный контур для поддержки колебаний. Генератор — это схема с обратной связью, использующая постоянный ток для получения колебаний переменного тока.

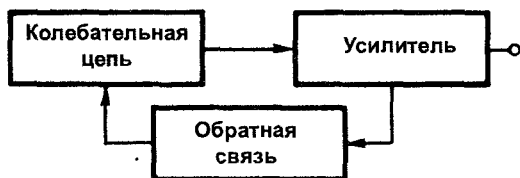


Рис. 29-1. Блок-схема генератора.



29-1. Вопросы

1. Что такое генератор?
2. Как работает колебательный контур?
3. Что надо сделать для поддержания колебаний в колебательном контуре?
4. Нарисуйте блок-схему генератора.
5. Каковы функции основных частей генератора?

29-2. ГЕНЕРАТОРЫ СИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Генераторы синусоидальных колебаний — это генераторы, вырабатывающие напряжение синусоидальной формы. Они классифицируются согласно их частотозадающим компонентам. Тремя основными типами генераторов синусоидальных колебаний являются LC генераторы, кварцевые генераторы и RC генераторы.

LC генераторы используют колебательный контур из конденсатора и катушки индуктивности, соединенных либо параллельно, либо последовательно, параметры контура определяют частоту колебаний. Кварцевые генераторы подобны LC генераторам, но обеспечивают более высокую стабильность колебаний. LC генераторы и кварцевые генераторы используются в диапазоне радиочастот. Они не подходят для применения на низких частотах. Для применения на этих частотах используются RC генераторы, имеющие резистивно-емкостную цепь для задания частоты колебаний.

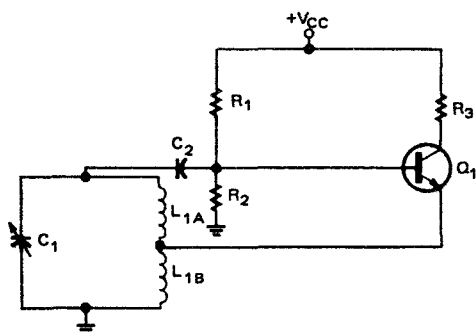


Рис. 29-2. Генератор Хартли с последовательной обратной связью.

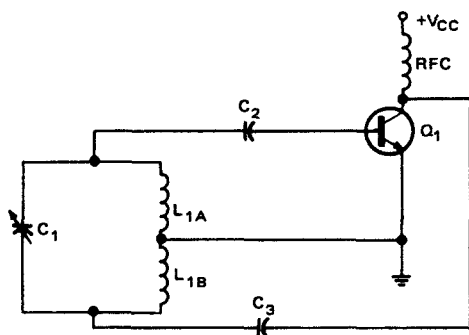


Рис. 29-3. Генератор Хартли с параллельной обратной связью.

Тремя основными типами LC генераторов являются генератор Хартли, генератор Колпитца и генератор Клаппа. На рис. 29-2 и 29-3 изображены два основных типа генератора Хартли. Катушка с отводом в колебательном контуре указывает, что эти цепи являются генераторами Хартли. Недостатком генератора Хартли с последовательной обратной связью (рис. 29-2) является то, что через часть колебательного контура течет постоянный ток. В генераторе Хартли с параллельной обратной связью постоянный ток в колебательный контур не поступает, так как в цепь обратной связи включен конденсатор.

Генератор Колпитца (рис. 29-4) похож на генератор Хартли с параллельной обратной связью, за исключением того, что катушка с отводом заменена двумя конденсаторами. Генератор Колпитца стабильнее, чем генератор Хартли и чаще используется.

Генератор Клаппа (рис. 29-5) является разновидностью генератора Колпитца. Основным отличием является добав-

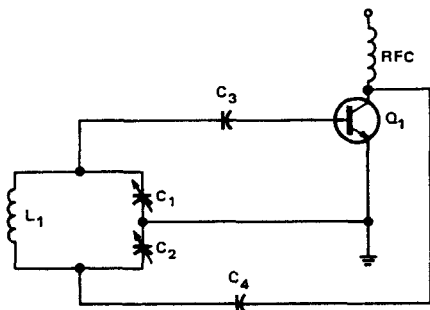


Рис. 29-4. Генератор Колпитца.

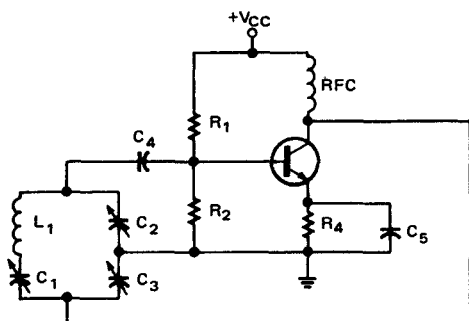


Рис. 29-5. Генератор Клаппа.

ление конденсатора, включенного последовательно с индуктивностью в колебательный контур. Этот конденсатор позволяет изменять частоту генератора.

Изменения температуры, старение компонентов и изменение требований к нагрузке служит причиной нестабильности генераторов. Если требуется высокая стабильность параметров генерируемого сигнала, используются кварцевые генераторы.

Кварц — это материал, преобразовывающий механическую энергию в электрическую, когда к нему прикладывают давление, и электрическую энергию в механическую, под воздействием напряжения. Когда к кристаллу кварца приложено переменное напряжение, кристалл начинает растягиваться и сжиматься, создавая механические колебания, частота которых соответствует частоте переменного напряжения.

Кварцы обладают собственной частотой колебаний, обусловленной их структурой. Если частота приложенного переменного напряжения совпадает с собственной частотой, колебания кристалла ярко выражены. Если частота приложенного переменного напряжения отличается от собственной частоты кварца, кристалл колеблется слабо. Частота механических колебаний кристалла кварца является величиной постоянной, что делает его идеальным для использования в генераторах.

В качестве генераторных кристаллов кроме кварца используются также турмалин и сегнетова соль. Сегнетова



соль наиболее электрически активна, но легко разрушается. Турмалин имеет наименьшую электрическую активность, но большую прочность. Кварц лучше всего подходит для использования в генераторах: он имеет хорошую электрическую активность, достаточно прочен и поэтому чаще всего используется в качестве генераторного кристалла.

Кристаллическая пластинка размещается между двумя металлическими пластинами, которые прижимаются пружинами для того, чтобы обеспечить электрический контакт этих пластин с кристаллом. После этого кристалл помещается в металлический корпус. На рис. 29-6 изображено схематическое обозначение кристалла. На схемах кристаллы обозначаются буквами Y и $XTAL$.

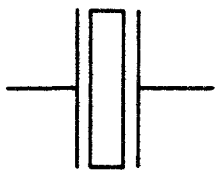


Рис. 29-6. Схематическое обозначение кварца.

На рис. 29-7 изображена схема генератора Хартли с параллельной обратной связью с добавлением кварца. Кварц включен последовательно в цепь обратной связи. Если частота колебательного контура отклоняется от частоты кварца, импеданс кварца увеличивается, уменьшая глубину обратной связи. Это приводит к изменению частоты колебательного контура.

На рис. 29-8 изображен генератор Колпитца с кварцем, включенным так же как и в генераторе Хартли. Кварц управляет величиной обратной связи. Колебательный LC контур может быть настроен на частоту кварца.

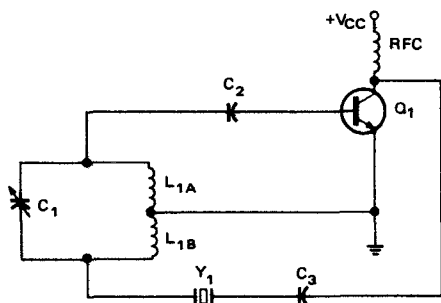


Рис. 29-7. Генератор Хартли с параллельной обратной связью, включающей кварц.

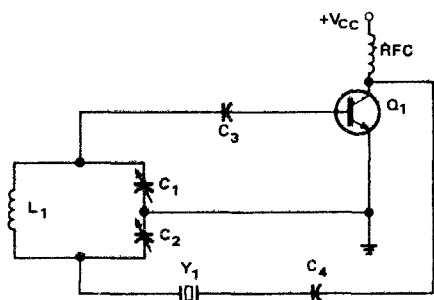


Рис. 29-8. Кварцевый генератор Колпитца.

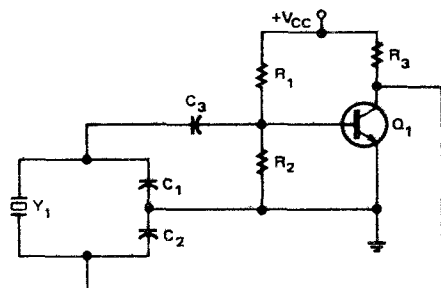


Рис. 29-9. Генератор Пирса.

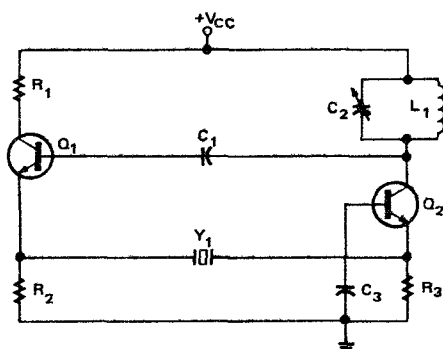


Рис. 29-10. Генератор Батлера.

На рис. 29-9 изображен генератор Пирса. Эта схема подобна генератору Колпитца, за исключением того, что катушка индуктивности в колебательном контуре заменена кварцем. Кварц управляет импедансом колебательного контура, что определяет величину обратной связи и стабилизирует генератор.

На рис. 29-10 изображен генератор Батлера. Схема собрана на двух транзисторах, использует колебательный



контур и кварц для определения и стабилизации частоты колебаний. Колебательный контур должен быть настроен на частоту кварца, в противном случае генератор не будет работать. Преимущество генератора Батлера в том, что к кварцу приложено небольшое напряжение, уменьшающее его механические деформации. Заменяв элементы колебательного контура, генератор можно заставить работать на частоте одной из гармоник кварца.

RC генераторы используют для задания частоты резистивно-емкостную цепь. Существуют два основных типа RC генераторов синусоидальных колебаний: генератор с фазосдвигающей цепью и генератор на основе моста Вина.

Генератор с фазосдвигающей цепью — это обычный усилитель с фазосдвигающей RC цепью обратной связи (рис. 29-11). Обратная связь должна сдвигать фазу сигнала на 180 градусов. Так как емкостное сопротивление изменяется при изменении частоты, то эта компонента чувствительна к частоте. Стабильность улучшается при уменьшении величины фазового сдвига на каждой RC цепочке. Однако, на комбинации RC цепочек имеют место потери мощности. Транзистор должен иметь достаточно высокий коэффициент усиления для компенсации этих потерь.

Генератор на основе моста Вина — это двухкаскадный усилитель с цепью опережения-запаздывания и делителем напряжения (рис. 29-12). Цепь опережения-запаздывания состоит из последовательной (R_1C_1) цепочки и параллельной (R_2C_2) цепочки. Схема называется цепью опережения-запаздывания потому, что выходное напряжение на некоторых частотах опережает входное напряжение по фазе, а

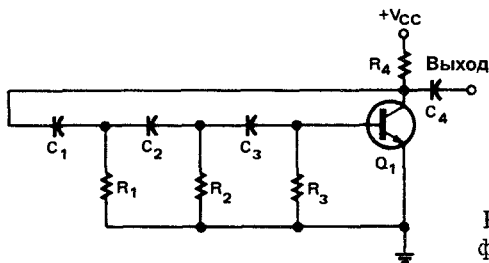


Рис. 29-11. Генератор с фазосдвигающей цепью.

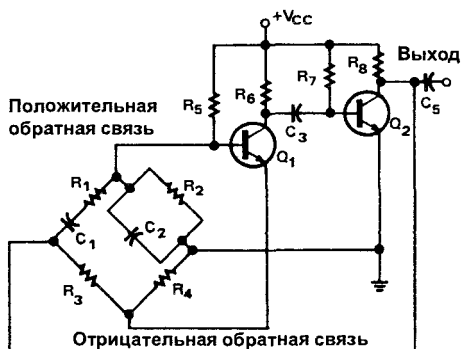


Рис. 29-12. Генератор на основе моста Вина.

на некоторых частотах отстает от него. На резонансной частоте сдвиг фаз равен нулю и выходное напряжение максимально. Резисторы R_3 и R_4 образуют цепь делителя напряжения, используемого для отрицательной обратной связи. Положительная обратная связь подается на базу, а отрицательная обратная связь на эмиттер генераторного транзистора Q_1 . Выход транзистора Q_1 через емкость связан с базой транзистора Q_2 , который усиливает напряжение и сдвигает его по фазе на 180 градусов. Выход транзистора Q_2 связан с мостовой цепью.

На рис. 29-13 изображен мостовой генератор Вина на интегральной микросхеме. Инвертирующий и неинвертирующий входы операционного усилителя идеальны для использования в генераторе на основе моста Вина. Усиление операционного усилителя высокое, что компенсирует все потери в цепи.

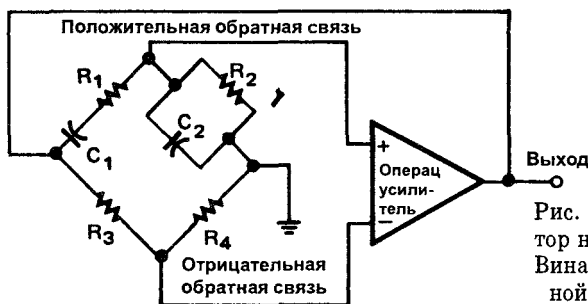


Рис. 29-13. Генератор на основе моста Вина на интегральной микросхеме.



29-2. Вопросы

1. Каковы три типа генераторов синусоидальных колебаний?
2. Нарисуйте схемы трех типов LC генератора.
3. Чем отличается генератор Колпитца от генератора Хартли?
4. Как можно улучшить стабильность LC генератора?
5. Каковы два типа RC генераторов, используемых для получения синусоидальных колебаний?

29-3. ГЕНЕРАТОРЫ НЕСИНУСОИДАЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ

Генераторы несинусоидальных колебаний генерируют несинусоидальные колебания. Это не какая-то особая форма колебаний. Несинусоидальные колебания могут иметь прямоугольную, пилообразную или треугольную форму или комбинацию этих форм. Общей характеристикой для всех генераторов несинусоидальных колебаний является то, что все они — релаксационные генераторы. **Релаксационный генератор** запасает энергию в реактивной компоненте в течение одной фазы цикла колебаний и постепенно отдает ее в течение релаксационной фазы цикла.

Релаксационными генераторами являются *блокинг-генераторы* и *мультивибраторы*. На рис. 29-14 изображена схема блокинг-генератора. Причиной названия является то, что транзистор легко переводится в режим блокирования (запирания). Условие блокирования определяется разрядом конденсатора C_1 . Конденсатор C_1 заряжается через переход эмиттер-база транзистора Q_1 . Однако когда конденсатор C_1 заряжен, у него есть только один путь разряда — через резистор R_1 . Величина постоянной времени RC це-

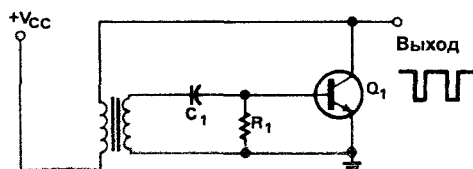


Рис 29-14. Блокинг-генератор.



почки из резистора R_1 и конденсатора C_1 устанавливает, как долго транзистор будет заперт (блокирован), а также определяет частоту колебаний. Большая постоянная времени соответствует низкой частоте, а маленькая постоянная времени — высокой частоте.

Если выходное напряжение взять с RC цепочки в эмиттерной цепи транзистора, то оно будет иметь пилообразную форму (рис. 29-15). RC цепочка определяет частоту колебаний и создает пилообразное напряжение. На транзистор Q_1 подано напряжение смещения в прямом направлении через резистор R_1 . Как только транзистор Q_1 начинает проводить, конденсатор C_1 быстро заряжается. Положительный потенциал на верхней обкладке конденсатора C_1 смещает эмиттерный переход в обратном направлении, запирая транзистор Q_1 . Конденсатор C_1 разряжается через резистор R_2 , образуя задний фронт пилообразного импульса. Когда конденсатор C_1 разряжается, транзистор Q_1 опять смещается в прямом направлении и начинает проводить, повторяя процесс.

Конденсатор C_1 и резистор R_2 определяют частоту колебаний. Сделав резистор R_2 переменным, можно изменять частоту колебаний. Если резистор R_2 имеет высокое сопротивление, постоянная времени RC цепочки велика и частота колебаний низка. Если резистор R_2 имеет низкое сопротивление, постоянная времени RC цепочки уменьшится и частота колебаний возрастет.

Мультивибратор — это релаксационный генератор, который может находиться в одном из двух временно стабильных состояний, и быстро переключаться из одного состояния в другое.

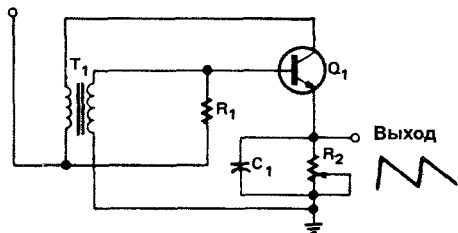


Рис. 29-15. Напряжение пилообразной формы, генерируемое блокинг-генератором.

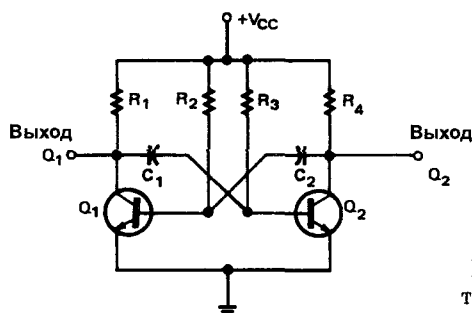


Рис. 29-16. Автоколебательный мультивибратор.

На рис. 29-16 изображена основная схема автоколебательного мультивибратора. Основой генератора являются два каскада, связанные между собой таким образом, что на вход каждого каскада подается сигнал с выхода другого каскада. Когда один каскад открыт, другой заперт до тех пор, пока эти условия не поменяются местами. Цепь самовозбуждается благодаря наличию положительной обратной связи. Частота колебаний определяется параметрами цепи связи.

Астабильный мультивибратор является разновидностью автоколебательных мультивибраторов. Астабильный мультивибратор вырабатывает прямоугольные импульсы. Изменением постоянной времени RC цепочки цепей связи можно получить прямоугольные импульсы любой желаемой ширины. Изменением значений резистора и конденсатора может быть изменена рабочая частота. Стабильность частоты мультивибратора выше, чем у типового блокинг-генератора.

Интегральной микросхемой, которая может быть использована в качестве астабильного мультивибратора является таймер 555 (рис. 29-17). Эта интегральная микросхема может выполнять много функций. Она состоит из двух компараторов, триггера, выходного каскада и разрядного транзистора. На рис. 29-18 изображена схема, в которой таймер 555 используется в качестве астабильного мультивибратора. Частота колебаний определяется резисторами R_A и R_B и конденсатором C_1 . Эта цепь находит широкое применение в промышленности.

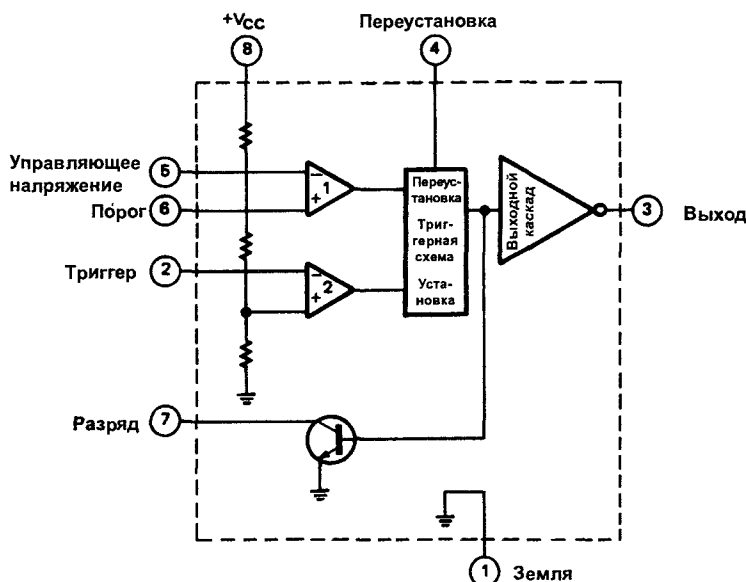


Рис. 29-17. Блок-схема интегральной микросхемы таймера 555.

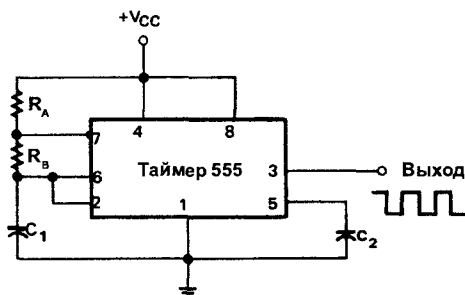


Рис. 29-18. Астабильный мультивибратор на основе таймера 555.

29-3. Вопросы

1. Нарисуйте наиболее часто встречающиеся виды несинусоидальных колебаний.
2. Что такое релаксационный генератор?
3. Приведите два примера релаксационных генераторов.
4. Нарисуйте схему блокинг-генератора.
5. Нарисуйте схему астабильного мультивибратора на основе таймера 555.



РЕЗЮМЕ

- Генератор — это невращающееся устройство, вырабатывающее переменный ток.
- Выходное напряжение генератора может быть синусоидальным, прямоугольным или пилообразным.
- Основное требование к генератору — его выходное напряжение должно иметь постоянную частоту или амплитуду.
- Когда конденсатор и катушка индуктивности соединяются параллельно, образуется колебательный контур.
- Когда к колебательному контуру прикладывается напряжение от внешнего источника, в нем возникают колебания.
- Колебания в колебательном контуре затухают из-за потерь, обусловленных наличием сопротивления.
- Для поддержания колебаний в колебательном контуре требуется положительная обратная связь.
- Генератор состоит из трех основных частей: частотоопределяющего устройства, усилителя и цепи обратной связи.
- Тремя основными типами генераторов синусоидальных колебаний являются LC генераторы, кварцевые генераторы и RC генераторы.
- Тремя основными типами LC генераторов являются генератор Хартли, генератор Колпитца и генератор Клаппа.
- Кварцевые генераторы обеспечивают большую стабильность частоты выходного сигнала, чем LC генераторы.
- RC генераторы используют резистивно-емкостные цепи для задания частоты генератора.
- Генераторы несинусоидальных колебаний вырабатывают несинусоидальные колебания.
- Генераторы несинусоидальных колебаний генерируют колебания прямоугольной, пилообразной или треугольной формы или комбинацию этих форм.
- Релаксационный генератор — это основа всех генераторов несинусоидальных колебаний.



- Релаксационный генератор запасает энергию в реактивной компоненте в течение части цикла колебаний.
- Примерами релаксационных генераторов являются блокинг-генераторы и мультивибраторы.

Глава 29. САМОПРОВЕРКА

1. Перечислите части генератора и объясните, какой вклад в работу генератора вносит каждая часть.
2. Объясните, как можно поддерживать колебания в колебательном контуре?
3. Каковы главные типы генераторов синусоидальных колебаний?
4. Как используются кварцы в схемах генераторов?
5. Чем генератор несинусоидальных колебаний отличается от генератора синусоидальных колебаний?
6. Из каких компонентов состоят генераторы несинусоидальных колебаний?

Глава 30.

ЦЕПИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить способы, с помощью которых можно изменить форму сигнала.
- Объяснить зависимость формы сигнала от вида частотных характеристик формирующих цепей.
- Дать определения *длительности импульса, скважности, времени нарастания и времени спада амплитуды сигнала, отрицательного и положительного выбросов*, а также «звона».
- Объяснить, как работают дифференцирующие и интегрирующие цепи.
- Описать цепи фиксации и ограничения.
- Описать различия между моностабильным и бистабильным мультивибраторами.
- Нарисовать схемы цепей формирования сигналов.

В электронике иногда бывает нужно изменить форму сигнала. Синусоидальный сигнал превратить в прямоугольный, прямоугольный в импульсный, а импульсный в прямоугольный. Форму сигнала можно проанализировать с помощью двух методов. Анализ формы сигнала посредством анализа его амплитуды в каждый момент времени, называется *анализом временных характеристик*. Анализ формы сигнала посредством разложения его на составляющие синусоиды, называется *анализом частотных характеристик*. Частотный анализ предполагает, что все периодические сигналы могут быть разложены на сумму синусоид.

30-1. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ СИГНАЛЫ

На рис. 30-1 изображены три основные формы сигналов, представленные в виде **функций времени**. Этими тре-

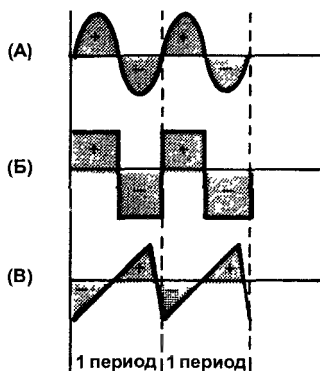


Рис. 30-1. Три основные формы периодического сигнала: (А) синусоидальная, (Б) прямоугольная, (В) пилообразная.

(ОСНОВНАЯ)	1-я гармоника	1000 Гц
	2-я гармоника	2000 Гц
	3-я гармоника	3000 Гц
	4-я гармоника	4000 Гц
	5-я гармоника	5000 Гц

Рис. 30-2. Основная частота 1000 герц и некоторые ее гармоники.

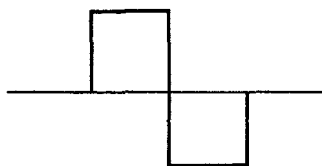


Рис. 30-3. Сигнал прямоугольной формы.

мя формами являются: синусоидальная, прямоугольная и пилообразная. Хотя все эти три формы различны, они имеют одинаковый период или частоту. С помощью различных электронных цепей эти формы могут быть превращены одна в другую.

Периодичность — это главное свойство всех колебаний. Согласно **концепции частотных характеристик** все периодические сигналы состоят из синусоид. Другими словами, любой периодический сигнал может быть сформирован путем сложения некоторого количества синусоид, имеющих различные амплитуды, фазы и частоты. Важность синусоид в том, что только они не могут быть искажены RC, RL и LC цепями.

Частота синусоиды, равная частоте периодического сигнала, называется *частотой основной гармоники*. Частоту основной гармоники также называют *первой гармоникой*. Частоты высших **гармоник** кратны частоте основной гармоники. Частота второй гармоники вдвое выше частоты основной гармоники, частота третьей гармоники втрое выше частоты основной гармоники и т.д. На рис. 30-2 приведена основная частота 1000 герц и несколько ее гармоник.

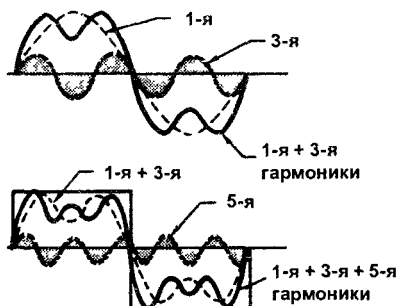


Рис. 30-4. Формирование сигнала прямоугольной формы методом сложения его частотных составляющих.

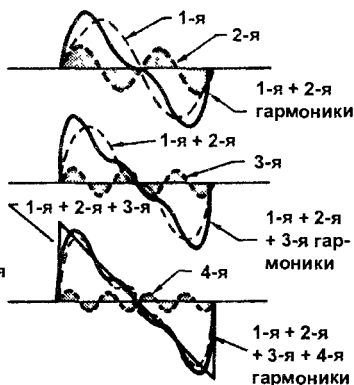


Рис. 30-5. Формирование сигнала пилообразной формы методом сложения его частотных составляющих.

Гармоники могут комбинироваться бесконечным числом способов и составлять любое периодическое колебание. Тип и число гармоник, необходимых для составления сигнала, зависит от формы этого сигнала.

Например, на рис. 30-3 изображен сигнал прямоугольной формы. Рис. 30-4 показывает, как прямоугольный сигнал может быть сформирован из комбинации основной гармоники и бесконечного числа нечетных гармоник, пересекающих ось координат в фазе с основной частотой.

Рис. 30-5 показывает формирование пилообразного сигнала. Он состоит из основной частоты и четных и нечетных гармоник, пересекающих ось координат со сдвигом по фазе на 180 градусов относительно основной частоты.

Осциллограф выводит на экран временные характеристики сигналов. *Анализатор спектра* (рис. 30-6) выводит на экран частотные характеристики сигнала. Анализ частотных характеристик может быть использован для определения влияния цепей на форму сигнала.

Периодические сигналы — это сигналы, повторяющиеся через определенные промежутки времени. *Период* сигнала измеряется интервалом времени от любой точки цикла до такой же точки следующего цикла (рис. 30-7).



Рис. 30-6. Анализатор спектра.

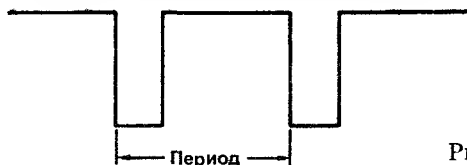


Рис. 30-7. Период сигнала.



Рис. 30-8. Длительность импульса сигнала.

Длительность импульса — это длина импульса по оси времени. **Скважность** — это отношение длительности импульса к его периоду. Скважность может быть представлена как процентное отношение времени существования импульса в течение каждого периода к периоду.

$$\text{Скважность} = \frac{\text{Длительность импульса}}{\text{Период}}$$

Все импульсы имеют время нарастания и время спада. **Время нарастания** — это время, требуемое для увеличения импульса от 10% до 90% от величины максимальной амплитуды. **Время спада** — это время, за которое импульс уменьшается от 90% до 10% от величины максимальной амплитуды (рис. 30-9).

Форма отрицательных и положительных выбросов и «звон», т.е. возникновение высокочастотных затухающих

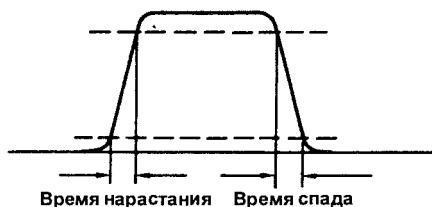
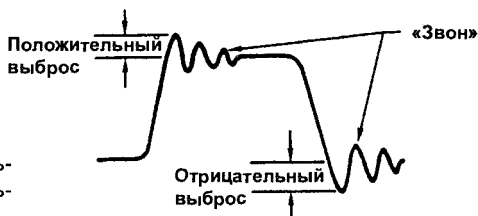


Рис. 30-9. Время нарастания импульса и время спада импульса измеряются на уровнях 10% и 90% от максимальной амплитуды сигнала.

Рис. 30-10. Положительный выброс, отрицательный выброс и «звон».



колебаний, показаны на рис. 30-10. *Положительный выброс* наблюдается, когда передний фронт импульса превышает его максимальное значение. *Отрицательный выброс* имеет место, когда задний фронт импульса превышает его минимальное значение. Оба эти явления наблюдаются при возникновении затухающих колебаний (при ударном возбуждении), и известны, как «звон». Явления эти нежелательны, но существуют вследствие несовершенства цепей.

30-1. Вопросы

1. Дайте определение *концепции частотных характеристик*.
2. Как конструируются следующие колебания согласно концепции частотных характеристик?
 - а. Прямоугольные колебания
 - б. Пилообразные колебания.
3. Что такое периодическое колебание?
4. Что такое скважность?
5. Нарисуйте примеры положительного выброса, отрицательного выброса и «звона» в применении к реальному сигналу.



30-2. ЦЕПИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА

РС цепь может изменять форму сложных сигналов так, что выходная форма будет совсем не похожа на входную. Величина искажения определяется постоянной времени РС цепи. Тип искажения определяется выходной компонентой, включенной параллельно выходу. Если параллельно выходу включен резистор, то цепь называется **дифференцирующей**. *Дифференцирующая* цепь используется в цепях синхронизации, для получения узких импульсов из прямоугольных, а также для получения переключающих импульсов и меток. Если параллельно выходу включен конденсатор, то цепь называется **интегрирующей**. Интегрирующая цепь используется в цепях формирования сигналов в радио, телевидении, радиолокаторах и в компьютерах.

На рис. 30-11 изображена дифференцирующая цепь. Напомним, что сложные сигналы состоят из основной частоты и большого числа гармоник. Когда сложный сигнал поступает на дифференцирующую цепь, она влияет на каждую частоту по разному. Отношение емкостного сопротивления (X_C) к R для каждой гармоники различно. Это приводит к тому, что каждая гармоника сдвигается по фазе и уменьшается по амплитуде в разной степени. В результате исходная форма сигнала искажается. На рис. 30-12 показано, что происходит с сигналом прямоугольной формы, прошедшим дифференцирующую цепь. На рис. 30-13 показано влияние различных постоянных времени РС цепи.

Интегрирующая цепь подобна дифференцирующей, за исключением того, что параллельно выходу включен конденсатор (рис. 30-14). На рис. 30-15 показано, как изменяется форма прямоугольного сигнала, прошедшего интегрирующую цепь. Интегрирующая цепь искажает сигнал не так, как дифференцирующая. На рис. 30-16 показано влияние различных постоянных времени РС цепи.

Другим типом цепи, изменяющим форму сигнала, является **ограничитель** сигнала (рис. 30-17). Цепь ограничения

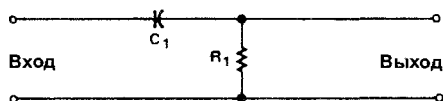


Рис. 30-11. Дифференцирующая цепь.

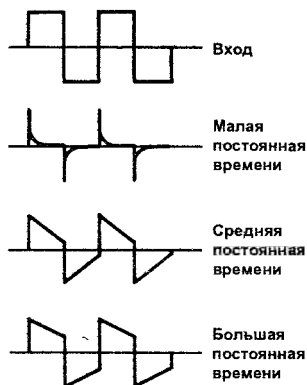


Рис. 30-13. Влияние различных постоянных времени на форму выходного сигнала дифференцирующей цепи.

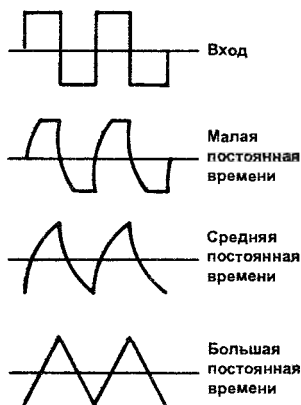


Рис. 30-16. Влияние различных постоянных времени на форму выходного сигнала интегрирующей цепи.

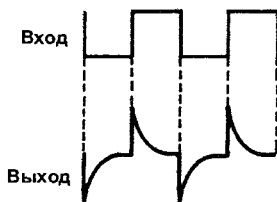


Рис. 30-12. Преобразование сигнала прямоугольной формы на выходе дифференцирующей цепи.

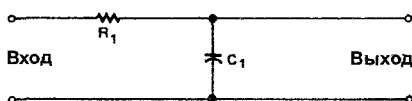


Рис. 30-14. Интегрирующая цепь.

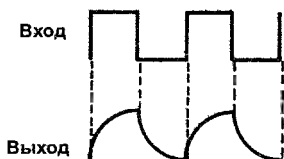


Рис. 30-15. Преобразование сигнала прямоугольной формы на выходе интегрирующей цепи.

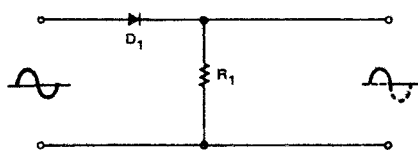


Рис. 30-17. Последовательный диодный ограничитель.

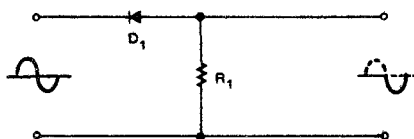


Рис. 30-18. Выходной сигнал при перемене полярности диода в цепи ограничителя.



может быть использована для обрезания пиков приложенного сигнала, для получения прямоугольного сигнала из синусоидального, для удаления положительных или отрицательных частей сигнала или для поддержания амплитуды входного сигнала на постоянном уровне. Диод смещен в прямом направлении и проводит ток в течение положительного полупериода входного сигнала. В течение отрицательного полупериода входного сигнала диод смещен в обратном направлении и ток не проводит. На рис. 30-17 показана форма сигнала на входе ограничителя: отрицательная часть входного сигнала обрезана. Цепь является, по существу, однополупериодным выпрямителем.

Используя напряжение смещения можно регулировать величину обрезаемого сигнала. На рис. 30-19 изображен последовательный ограничитель со смещением. Диод не может проводить до тех пор, пока входной сигнал не превысит напряжение смещения. На рис. 30-20 показан выходной сигнал, полученный в результате перемены полярности диода и напряжения смещения в последовательном ограничителе.

Цепь параллельного ограничения выполняет те же функции, что и последовательный ограничитель (рис. 30-21). Разница состоит в том, что диод включен параллельно выходу. Эта цепь обрезает отрицательную часть входного сигнала. На рис. 30-22 показано влияние перемены полярности диода. Параллельный ограничитель может быть смещен для изменения уровня ограничения сигнала, как показано на рис. 30-23 и рис. 30-24.

Если необходимо ограничить сигнал и с положительной, и с отрицательной сторон, используются два смещенных диода, включенных параллельно выходу (рис. 30-25). Это позволяет получить выходной сигнал с амплитудой, не превышающей заранее определенный положительный и отрицательный уровень. При таком преобразовании выходной сигнал приобретает форму, близкую к прямоугольной. Следовательно, эта цепь называется генератором прямоугольных колебаний.

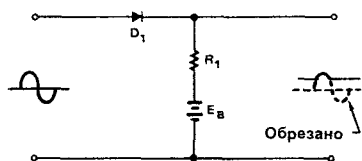


Рис. 30-19. Последовательный диодный ограничитель со смещением.

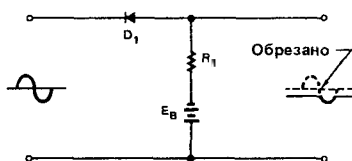


Рис. 30-20. Выходной сигнал при перемене полярности диода и источника смещения в смещенном последовательном диодном ограничителе.

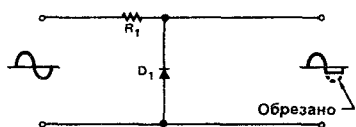


Рис. 30-21. Параллельный диодный ограничитель.

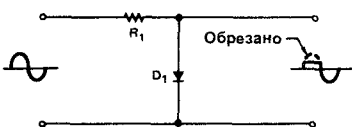


Рис. 30-22. Перемена полярности диода в параллельном диодном ограничителе.

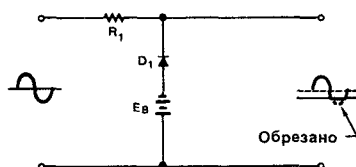


Рис. 30-23. Параллельный диодный ограничитель со смещением.

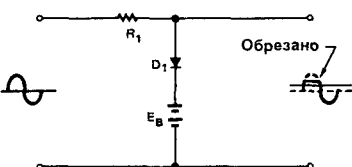


Рис. 30-24. Перемена полярности диода и источника смещения в смещенном параллельном диодном ограничителе.

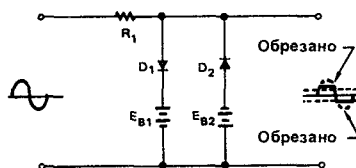


Рис. 30-25. Ограничитель, используемый для ограничения сигнала и с положительной, и с отрицательной сторон.

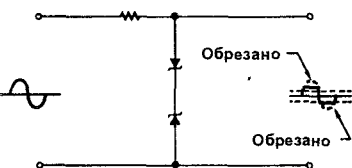


Рис. 30-26. Другая схема ограничителя, ограничивающая амплитуду сигнала как с положительной стороны, так и с отрицательной.



На рис. 30-26 изображена другая схема ограничителя, ограничивающего сигнал как с положительной стороны, так и с отрицательной с помощью двух стабилитронов. Выходной сигнал ограничен с двух сторон напряжениями стабилизации стабилитронов. Между этими пределами ни один стабилитрон не проводит и входной сигнал проходит на выход.

Иногда желательно изменить уровень отсчета постоянного тока для сигнала переменного тока. *Уровень отсчета* постоянного тока — это уровень, относительно которого измеряется сигнал переменного тока. **Фиксатор** может использоваться для фиксации верхнего или нижнего значения сигнала при заданном постоянном напряжении. В отличие от ограничителя сигнала, фиксатор не изменяет форму сигнала. Диодный фиксатор (рис. 30-27) называют восстановителем постоянной составляющей. Эта цепь обычно используется в радиолокаторах, телевидении, телекоммуникациях и в компьютерах. В изображенной цепи на вход подан сигнал прямоугольной формы. Назначение цепи — ограничить максимальное значение сигнала напряжением 0 вольт без изменения формы сигнала.

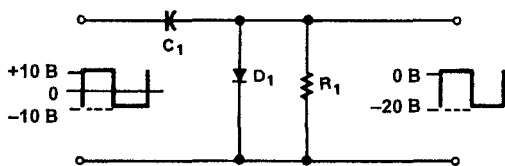


Рис. 30-27. Диодный фиксатор.

30-2. Вопросы

- Нарисуйте схемы следующих RC цепей:
 - Дифференцирующей;
 - Интегрирующей.
- Каковы функции дифференцирующей и интегрирующей цепей?



3. Нарисуйте схемы следующих цепей:
 - а. Ограничителя;
 - б. Фиксатора.
4. Каковы функции ограничителя и фиксатора?
5. Для чего применяются следующие цепи:
 - а. Дифференцирующая;
 - б. Интегрирующая;
 - в. Ограничитель;
 - г. Фиксатор.

30-3. ЦЕПИ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Префикс *моно-* означает *одно*. **Моностабильный мультивибратор** имеет только одно стабильное состояние. Его иначе называют ждущим мультивибратором, так как он выдает только один выходной импульс для каждого входного импульса. Выходной импульс обычно длиннее входного. Следовательно, эта цепь может также называться распырителем импульсов. Обычно схема используется, как логический элемент в компьютерах, электронных схемах управления и в коммуникационном оборудовании.

На рис. 30-28 изображена схема моностабильного мультивибратора. Цепь обычно находится в стабильном состоянии. Под воздействием входного пускового сигнала, она переключается в нестабильное состояние. Время нахождения схемы в нестабильном состоянии определяется посто-

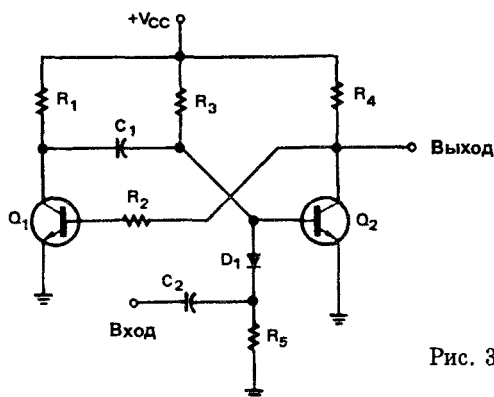


Рис. 30-28. Моностабильный мультивибратор.



янной времени RC цепочки, состоящей из резистора R_2 и конденсатора C_1 . Конденсатор C_2 и резистор R_5 образуют дифференцирующую цепь, преобразующую входной импульс в положительный и отрицательный пики. Диод D_1 позволяет пройти только отрицательному пику, включающему цепь.

Бистабильный мультивибратор — это мультивибратор, имеющий два стабильных состояния (*би-* означает *два*). Эта цепь требует двух входов для завершения полного цикла. Импульс, поданный на один вход устанавливает цепь в одно из стабильных состояний. Импульс на другом входе переустанавливает цепь в другое стабильное состояние. Эта цепь часто называется **триггером** из-за своего режима работы.

Основная триггерная схема генерирует прямоугольные колебания для использования в качестве стробирующих или синхронизирующих сигналов для операций переключения в схемах двоичных счетчиков (рис. 30-29). В сущности, это два транзисторных усилителя, у которых выход каждого транзистора связан со входом другого. Когда на вход установки подается входной сигнал, транзистор Q_1 открывается и запирает транзистор Q_2 . Когда транзистор Q_2 закрыт, он подает положительный потенциал на базу транзистора Q_1 , удерживая его в открытом состоянии. Если теперь подать импульс на вход сброс, транзистор Q_2

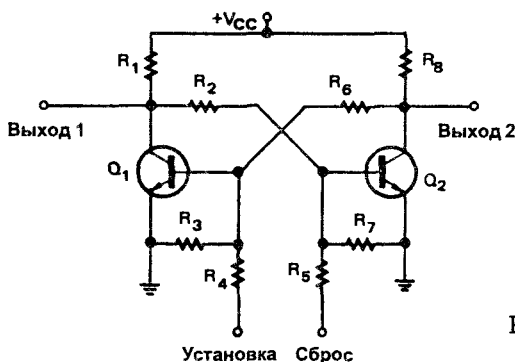


Рис. 30-29. Основная схема триггера.



откроется, запирая транзистор Q_1 . Запертый транзистор Q_1 удерживает транзистор Q_2 открытым.

Триггеры, собранные из дискретных компонентов, в настоящее время применяются редко. Однако интегральные микросхемы триггеров находят широкое применение. Это, возможно, наиболее важная цепь в цифровой электронике, используемая для деления частоты, хранения данных, их счета и обработки.

Другую бистабильную цепь представляет собой **триггер Шмитта** (рис. 30-30). Одним из применений триггера Шмитта является преобразование синусоидальных, пилообразных и других колебаний в колебания прямоугольной формы. Эта цепь отличается от обычного бистабильного мультивибратора тем, что одна из цепей связи заменена резистором (R_3), общим для обоих эмиттеров, и это обеспечивает дополнительное восстановление сигналов для ускорения работы цепи и спрямляет передний и задний фронты выходных импульсов.

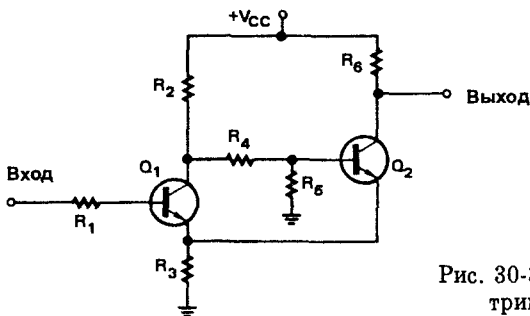


Рис. 30-30. Основная схема триггера Шмитта.

30-3. Вопросы

1. Что такое моностабильный мультивибратор?
2. Нарисуйте схему ждущего мультивибратора.
3. Что такое бистабильный мультивибратор?
4. Нарисуйте схему триггера.
5. Чем триггер Шмитта отличается от стандартного бистабильного мультивибратора?



РЕЗЮМЕ

- Форма сигналов может быть изменена с помощью различных электронных цепей.
- Частотный анализ показывает, что все периодические сигналы состоят из синусоид.
- Периодические сигналы имеют одинаковую форму во всех циклах.
- Только синусоиды не искажаются RC, RL и LC цепями.
- Частотный анализ показывает, что несинусоидальные периодические сигналы состоят из синусоид основной частоты и комбинации четных и нечетных гармоник.
- Прямоугольные периодические колебания состоят из основной частоты и бесконечного количества нечетных гармоник.
- Пилообразные периодические колебания состоят из основной частоты и четных и нечетных гармоник, пересекающих ось координат со сдвигом по фазе на 180° градусов по отношению к основной частоте.
- Период сигнала измеряется интервалом времени от любой точки цикла до такой же точки следующего цикла.
- Длительность импульса — это длина импульса по оси времени.
- Скважность — это отношение длительности импульса к его периоду.
- Время нарастания импульса — это время, необходимое для увеличения импульса от 10% до 90% от величины максимальной амплитуды.
- Время спада импульса — это время, за которое импульс уменьшается от 90% до 10% от величины максимальной амплитуды.
- Положительный выброс, отрицательный выброс и «звон» нежелательны в цепи и существуют вследствие несовершенства цепей.
- RC цепь может быть использована для изменения формы сложного колебания.



- Если параллельно выходу RC цепи подключен резистор, то цепь называется дифференцирующей.
- Если параллельно выходу RC цепи подключен конденсатор, то цепь называется интегрирующей.
- Цепи ограничения используются для обрезания пиков приложенного сигнала или для поддержания постоянной амплитуды.
- Цепи фиксации используются для фиксации верхнего или нижнего значения сигнала при заданном постоянном напряжении.
- Моностабильный мультивибратор (ждущий мультивибратор) выдает только один выходной импульс для каждого входного импульса.
- Бистабильные мультивибраторы имеют два стабильных состояния и называются триггерами.
- Триггер Шмитта — это бистабильный мультивибратор специального назначения.

Глава 30. САМОПРОВЕРКА

1. Опишите принципы частотного анализа формы периодических сигналов.
2. Почему в цепях формирования сигналов имеют место такие проблемы, как положительный выброс, отрицательный выброс и «звон»?
3. Опишите, где используются интегрирующие и дифференцирующие цепи.
4. Как можно изменить уровень постоянной составляющей сигнала?
5. Объясните разницу между функциями моностабильной и бистабильной цепи.
6. Каково значение триггера?

Раздел 5.

ЦИФРОВЫЕ ЭЛЕКТРОННЫЕ ЦЕПИ



Специальность — техник по обслуживанию компьютеров

Техник устанавливает, обслуживает и ремонтирует компьютерное оборудование и системы. Во-первых, он отвечает за прокладку кабелей соединения оборудования, во-вторых, он должен тщательно тестировать новые системы, решая все проблемы, стоящие перед пользователем оборудования, в-третьих, периодически техник обслуживает оборудование для того, чтобы убедиться в том, что оно нормально функционирует. Знание основ и специализированного тестирующего оборудования и инструментов является необходимым.

Техники уделяют много времени работе с людьми. Они выслушивают претензии, отвечают на вопросы и иногда дают советы по приобретению оборудования, по профилактике и способам поддержания эффективной работы оборудования. Опытные техники часто обучают новых техников, а иногда ограничиваются ролью диспетчера, перед тем как стать диспетчерами или менеджерами по сервису.

Для подготовки техника по обслуживанию компьютеров требуется один-два года подготовки по основам электроники и электротехники в колледже, профессионально-технической школе или военном училище. Он должен уметь обслужить любое новое оборудование и программное обеспечение.

Прогнозы показывают, что потребность в техниках по обслуживанию компьютеров будет высокой и после 2000 года. Экономика развивается, и потребность в компьютерном оборудовании будет увеличиваться. Следовательно, потребуется больше техников для установки и обслуживания оборудования.

Глава 31.

ДВОИЧНАЯ СИСТЕМА СЧИСЛЕНИЯ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать двоичную систему счисления.
- Перечислить значения разрядов для каждого бита двоичного числа.
- Преобразовывать двоичные числа в десятичные.
- Преобразовывать десятичные числа в двоичные.
- Преобразовывать десятичные числа в двоично-десятичный код.
- Преобразовывать числа в двоично-десятичном коде в десятичные.

Система счисления — это не более, чем код. Для каждой отдельной величины существует приписанный ей символ. Когда код известен, можно выполнять вычисления. Это возможно с помощью арифметики и высшей математики.

Простейшей системой счисления является **двоичная**. *Двоичная система* содержит только две цифры — 0 и 1. Эти цифры имеют такое же значение, как и в десятичной системе счисления.

Двоичная система счисления используется в цифровых и микропроцессорных цепях благодаря ее простоте. Двоичные данные представляются двоичными цифрами, называемыми **битами**. Термин *бит* означает двоичная цифра (разряд) (*binary digit*).

31-1. ДВОИЧНЫЕ ЧИСЛА

Десятичная система счисления называется системой с основанием 10, поскольку она использует десять цифр от 0 до 9. Двоичная система — это система с основанием два,



Таблица десятичных и двоичных чисел					
Десятичное число	Двоичное число				
	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
	16	8	4	2	1
0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	1
2	0	0	0	1	0
3	0	0	0	1	1
4	0	0	1	0	0
5	0	0	1	0	1
6	0	0	1	1	0
7	0	0	1	1	1
8	0	1	0	0	0
9	0	1	0	0	1
10	0	1	0	1	0
11	0	1	0	1	1
12	0	1	1	0	0
13	0	1	1	0	1
14	0	1	1	1	0
15	0	1	1	1	1
16	1	0	0	0	0
17	1	0	0	0	1
18	1	0	0	1	0
19	1	0	0	1	1
20	1	0	1	0	0
21	1	0	1	0	1
22	1	0	1	1	0
23	1	0	1	1	1
24	1	1	0	0	0
25	1	1	0	0	1

Рис. 31-1. Десятичные числа и эквивалентные двоичные числа.

поскольку она использует две цифры, 0 и 1. Положение 0 или 1 в двоичном числе показывает их значение в числе и называется значением разряда или его весом. Значения разрядов двоичного числа увеличиваются как степени 2.



	Значение разряда					
	32	16	8	4	2	1
Степень 2	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0

Счет в двоичной системе начинается с чисел 0 и 1. Как и в десятичной системе счисления, каждая двоичная цифра отличается от предыдущей на единицу. Сумма единицы и нуля дает единицу, а сумма двух единиц дает ноль, и при этом прибавляется единица в старшем разряде. На рис. 31-1 показана последовательность двоичных чисел, образованная по описанному алгоритму.

Для определения наибольшего значения, которое может быть представлено данным количеством разрядов с основанием 2, используйте следующую формулу:

$$\text{Наибольшее число} = 2^n - 1,$$

где n — число битов (или число использованных значений разрядов).

ПРИМЕР: два бита могут быть использованы для счета от 0 до 3, так как

$$2^n - 1 = 2^2 - 1 = 4 - 1 = 3.$$

Четыре бита необходимы для счета от 0 до 15, так как

$$2^n - 1 = 2^4 - 1 = 16 - 1 = 15.$$

31-1. Вопросы

1. В чем преимущество двоичной системы счисления перед десятичной при использовании в цифровых цепях?
2. Как определить наибольшее значение двоичного числа при заданном числе разрядов?
3. Каково наибольшее значение двоичного числа с:
 - а. 4 битами,
 - б. 8 битами,
 - в. 12 битами,
 - г. 16 битами.



31-2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ДВОИЧНЫХ ЧИСЕЛ В ДЕСЯТИЧНЫЕ И НАОБОРОТ

Как установлено, двоичное число представляет собой число с весом каждого разряда. Значение двоичного числа может быть определено суммированием произведений каждой цифры на вес ее разряда. Метод вычисления двоичного числа показан на следующем примере:

ПРИМЕР:

	Значение разряда					
	32	16	8	4	2	1
Двоичное число	1	0	1	1	0	1
Значение:	$1 \times 32 = 32$					
	$0 \times 16 = 0$					
	$1 \times 8 = 8$					
	$1 \times 4 = 4$					
	$0 \times 2 = 0$					
	$+ 1 \times 1 = 1$					
	$101101_2 = 45_{10}$					

Число 45 является десятичным эквивалентом двоичного числа 101101.

Дробные числа также могут быть представлены в двоичной форме путем размещения двоичных цифр справа от двоичной запятой, так же как и десятичные цифры размещаются справа от десятичной запятой. Все цифры справа от запятой имеют вес, представленный отрицательными степенями 2 или дробными значениями разрядов.

Степень 2	Значение разряда
2^5	$= 32$
2^4	$= 16$
2^3	$= 8$
2^2	$= 4$
2^1	$= 2$
2^0	$= 1$

десятичная запятая



$$2^{-1} = \frac{1}{2^1} = \frac{1}{2} = 0,5$$

$$2^{-2} = \frac{1}{2^2} = \frac{1}{4} = 0,25$$

$$2^{-3} = \frac{1}{2^3} = \frac{1}{8} = 0,125$$

$$2^{-4} = \frac{1}{2^4} = \frac{1}{16} = 0,0625.$$

ПРИМЕР: Определить десятичное значение двоичного числа 111011,011.

Двоичное число		Значение разряда	Значение
1	×	32	= 32
1	×	16	= 16
1	×	8	= 8
0	×	4	= 0
1	×	2	= 2
1	×	1	= 1
0	×	0,5	= 0
1	×	0,25	= 0,25
+ 1	×	0,125	= 0,125

$$111011,011_2 = 59,375$$

При работе с цифровым оборудованием часто бывает необходимо преобразовывать числа из двоичной системы в десятичную, и наоборот. Наиболее популярный способ преобразования десятичных чисел в двоичные — это последовательное деление десятичного числа на 2, с записью остатка после каждого деления. Остатки, взятые в обратном порядке, образуют двоичное число.

ПРИМЕР: Преобразовать 11 в двоичное число последовательным делением на 2. (Самый Младший Разряд).

$$11 \div 2 = 5 \text{ с остатком } 1 \quad \text{СМР}$$

$$5 \div 2 = 2 \text{ с остатком } 1$$

$$2 \div 2 = 1 \text{ с остатком } 0$$

$$1 \div 2 = 0 \text{ с остатком } 1$$





($1/2 = 0$ означает, что 1 не делится на 2, так что 1 является остатком). Десятичное число 11 равно 1011 в двоичной системе.

Этот процесс может быть упрощен путем записи чисел упорядоченным образом, как это показано на примере преобразования 25 в двоичное число.

ПРИМЕР:

2	25	СМР
2	12	1
2	6	0
2	3	0
2	1	1
	0	1

Десятичное число 25 равно двоичному числу 11001.

Дробные числа преобразовываются по другому: число умножается на 2 и целая часть записывается как двоичная дробь.

ПРИМЕР: Преобразовать десятичную дробь 0,85 в двоичную дробь последовательным умножением на 2.

	СМР
$0,85 \times 2 = 1,70 = 0,70$ с целой частью 1	1
$0,70 \times 2 = 1,40 = 0,40$ с целой частью 1	1
$0,40 \times 2 = 0,80 = 0,80$ с целой частью 0	0
$0,80 \times 2 = 1,60 = 0,60$ с целой частью 1	1
$0,60 \times 2 = 1,20 = 0,20$ с целой частью 1	1
$0,20 \times 2 = 0,40 = 0,40$ с целой частью 0.	0

Умножение на 2 продолжается до тех пор, пока не будет достигнута необходимая точность. Десятичная дробь 0,85 равна 0,110110 в двоичной форме.

ПРИМЕР: Преобразовать десятичное число 20,65 в двоичное число. Разделите 20,65 на целую часть 20 и дробную 0,65 и примените описанные выше методы.

2	20	СМР
2	10	0
2	5	0
2	2	1
2	1	0
	0	1



Десятичное $20 =$ двоичному 10100

и

СМР

$0,65 \times 2 = 1,30 = 0,30$ с целой частью 1

$0,30 \times 2 = 0,60 = 0,60$ с целой частью 0

$0,60 \times 2 = 1,20 = 0,20$ с целой частью 1

$0,20 \times 2 = 0,40 = 0,40$ с целой частью 0

$0,40 \times 2 = 0,80 = 0,80$ с целой частью 0

$0,80 \times 2 = 1,60 = 0,60$ с целой частью 1

$0,60 \times 2 = 1,20 = 0,20$ с целой частью 1.

Десятичная $0,65 =$ двоичной $0,1010011$



Комбинируя два числа, получим $20,65_{10} = 10100,1010011_2$. Это 12-разрядное число является приближенным, потому что преобразование дроби было прервано после получения 7 разрядов.

31-2. Вопросы

1. Чему равно значение каждого разряда 8-разрядного двоичного числа?
2. Чему равно значение каждого разряда для 8 разрядов правее десятичной точки?
3. Преобразуйте следующие двоичные числа в десятичные:
 - а. 1001;
 - б. 11101111;
 - в. 11000010;
 - г. 10101010,1101;
 - д. 10110111,0001.
4. В чем состоит процесс преобразования десятичных чисел в двоичные?
5. Преобразуйте следующие десятичные числа в двоичные:
 - а. 27;
 - б. 34,6;
 - в. 346;
 - г. 321,456;
 - д. 7465.



31-3. КОД 8421

Код 8421 — это двоично-десятичный код (ДДК), состоящий из четырех двоичных разрядов. Он используется для представления цифр от 0 до 9. Обозначение 8421 относится к двоичному весу 4 разрядов.

Степени 2:	2^3	2^2	2^1	2^0
Двоичный вес:	8	4	2	1

Основным достоинством этого кода является то, что он допускает легкое преобразование из десятичной формы в двоичную, и наоборот. Поэтому двоично-десятичный код используется всегда, если не оговорено другое.

Каждая десятичная цифра (от 0 до 9) представляется двоичной комбинацией следующим образом:

Десятичное	Код 8421
0	0000
1	0001
2	0010
3	0011
4	0100
5	0101
6	0110
7	0111
8	1000
9	1001

Хотя с помощью четырех двоичных разрядов можно представить 16 чисел (2^4), шесть кодовых комбинаций для чисел, больших 9 (1010, 1011, 1100, 1101, 1110 и 1111), в коде 8421 не используются.

Для того чтобы выразить любое десятичное число с помощью кода 8421, замените каждую десятичную цифру соответствующим 4-разрядным кодом.

ПРИМЕР: Преобразовать следующие десятичные числа в двоично-десятичный код: 5, 13, 124, 576, 8769.



$$\begin{aligned}5 &= 0101 \\13 &= 0001\ 0011 \\124 &= 0001\ 0010\ 0100 \\576 &= 0101\ 0111\ 0110 \\8769 &= 1000\ 0111\ 0110\ 1001\end{aligned}$$

Для преобразования числа из двоично-десятичного кода в десятичную систему, разбейте число на группы по 4 разряда. После этого запишите десятичные цифры, соответствующие каждой 4-разрядной группе.

ПРИМЕР: Преобразуйте числа, записанные двоично-десятичным кодом в десятичную систему: 10010101, 1001000, 1100111, 1001100101001, 1001100001110110.

$$\begin{aligned}1001\ 0101 &= 95 \\0100\ 1000 &= 48 \\0110\ 0111 &= 67 \\0001\ 0011\ 0010\ 1001 &= 1329 \\1001\ 1000\ 0111\ 0110 &= 9876\end{aligned}$$

Замечание: Если в крайней группе слева не хватает разрядов до четырех, то к ней добавляются нули.

31-3. Вопросы

1. Что такое код 8421 и как он используется?
2. Преобразуйте следующие десятичные числа в двоично-десятичный код:
 - а. 17;
 - б. 100;
 - в. 256;
 - г. 778;
 - д. 8573.
3. Преобразуйте следующие двоично-десятичные коды в десятичные числа:
 - а. 1000 0010;
 - б. 0111 0000 0101;
 - в. 1001 0001 0011 0100;
 - г. 0001 0000 0000 0000;
 - д. 0100 0110 1000 1001.



РЕЗЮМЕ

- Двоичная система счисления — это простейшая система счисления.
- Двоичная система счисления содержит две цифры — 0 и 1.
- Двоичная система счисления используется для представления данных в цифровых и компьютерных системах.
- Двоичные данные представляются двоичными разрядами, которые называются битами.
- Термин бит происходит от названия двоичный разряд (binary digit).
- Значение каждого более высокого разряда двоичного числа увеличивается как степень 2.
- Наибольшее число, которое может быть представлено данным количеством разрядов в двоичной системе равно $2^n - 1$, где n — количество разрядов.
- Значение двоичного числа может быть определено суммированием произведений каждой цифры на вес ее разряда.
- Дробные числа представляются отрицательными степенями 2.
- Для преобразования десятичного числа в двоичное, десятичное число последовательно делится на 2, и после каждого деления записывается остаток. Эти остатки, расположенные в обратном порядке, образуют двоичное число.
- Код 8421 или двоично-десятичный код используется для представления цифр от 0 до 9.
- Достоинством двоично-десятичного кода является возможность легкого преобразования чисел из десятичной формы в двоичную и наоборот.

Глава 31. САМОПРОВЕРКА

1. Запишите в двоичной форме десятичные числа от 0 до 27.
2. Сколько двоичных разрядов нужно для представления десятичного числа 100?



3. Опишите процесс преобразования десятичного числа в двоичное число.
4. Преобразуйте следующие двоичные числа в десятичные:
 - а. 100101,001011;
 - б. 111101110,11101110;
 - в. 10000001,00000101.
5. Опишите процесс преобразования десятичных чисел в двоично-десятичный код.
6. Преобразуйте следующие двоично-десятичные коды в десятичные числа:
 - а. 0100 0001 0000 0110;
 - б. 1001 0010 0100 0011;
 - в. 0101 0110 0111 1000.

Глава 32.

ОСНОВНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить и объяснить функции основных логических элементов.
- Нарисовать схематические обозначения для основных логических элементов.
- Начертить таблицы истинности для основных логических элементов.

Все цифровое оборудование, от простого до сложного, сконструировано с использованием небольшого количества основных схем. Эти схемы, называемые *логическими элементами*, выполняют некоторые логические функции с двоичными данными.

Существуют два основных типа логических схем: схемы принятия решений и память. *Логические схемы принятия решений* контролируют двоичные сигналы на входах и выдают выходной сигнал, основанный на состояниях входов и характеристиках логической схемы. *Схемы памяти* используются для хранения двоичных данных.

32-1. ЭЛЕМЕНТ И

Элемент И — это логическая схема, имеющая два или более входа и один выход. На выходе элемента И появляется 1 только тогда, когда на все его входы поступает сигнал 1. Если на какой-либо из входов поступает 0, на выходе появляется 0.

На рис. 32-1 показаны стандартные обозначения, используемые для элементов И. Элемент И может иметь любое количество входов, большее одного. Показанные на рисунке

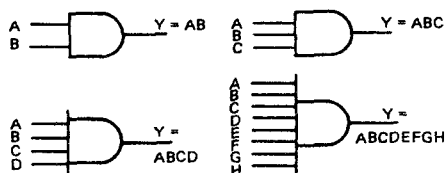


Рис. 32-1. Логические обозначения элемента И.

Входы		Выход
A	B	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 32-2. Таблица истинности для двухвходового элемента И.

обозначения представляют наиболее часто используемые элементы с двумя, тремя, четырьмя и восемью входами.

Работу элемента И отражает таблица на рис. 32-2. Такая таблица, называемая *таблицей истинности*, показывает выходное состояние элемента для любых возможных состояний входов. Входы обозначены A и B. Выход обозначен Y. Общее число возможных комбинаций в таблице истинности определяется следующей формулой:

$$N = 2^n,$$

где N — общее количество возможных комбинаций, n — общее число входных переменных.

ПРИМЕР:

Для двух входных переменных $N = 2^2 = 4$.

Для трех входных переменных $N = 2^3 = 8$.

Для четырех входных переменных $N = 2^4 = 16$.

Для восьми входных переменных $N = 2^8 = 256$.

Элемент И выполняет операцию логического умножения. Логическое умножение известно как функция И. Выход элемента И математически может быть представлен равенством $Y = A \wedge B$ или $Y = AB$. Функция И — точка между двумя переменными A и B.

32-1. Вопросы

1. При каких условиях на выходе элемента И появляется 1?



2. Нарисуйте схематическое обозначение, используемое для элемента И с двумя входами.
3. Изобразите таблицу истинности для элемента И с тремя входами.
4. Какую логическую операцию выполняет элемент И?
5. Как алгебраически изображается операция, выполняемая элементом И?

32-2. ЭЛЕМЕНТ ИЛИ

На выходе элемента **ИЛИ** появляется 1, если на любой из его входов подана 1. На его выходе появляется 0, если на все его входы поданы 0. Значения на выходе элемента **ИЛИ** с двумя входами приведены в таблице истинности на рис. 32-3. Общее число возможных комбинаций выражается формулой $N = 2^2 = 4$. В таблице истинности приведены все четыре комбинации.

Элемент **ИЛИ** выполняет логическую операцию сложения. Алгебраически операция, выполняемая элементом **ИЛИ**, выражается следующим образом $Y = A + B$ или $Y = A \vee B$. Знак плюс обозначает функцию **ИЛИ**.

На рис. 32-4 изображены логические обозначения для элемента **ИЛИ**. Входы обозначены A и B, а выход обозначен Y. Элемент **ИЛИ** может иметь любое число входов, большее одного. На рисунке изображены элементы **ИЛИ** с двумя, тремя, четырьмя и восемью входами.

32-2. Вопросы

1. При каких условиях на выходе элемента **ИЛИ** появляется 1?
2. Нарисуйте схематическое обозначение, используемое для элемента **ИЛИ** с двумя входами.
3. Изобразите таблицу истинности для элемента **ИЛИ** с тремя входами.
4. Какую логическую операцию выполняет элемент **ИЛИ**?
5. Как алгебраически изображается операция, выполняемая элементом **ИЛИ**?



Входы		Выход
A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	1

Рис. 32-3. Таблица истинности для двухвходового элемента ИЛИ.

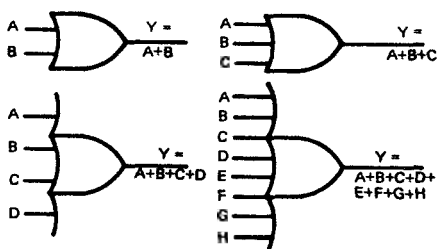


Рис. 32-4. Логические обозначения элемента ИЛИ.

32-3. ЭЛЕМЕНТ НЕ

Простейшей логической цепью является цепь НЕ. Она выполняет функцию, которая называется инверсией или отрицанием, и обычно называется *инвертором*. Цель инвертора — сделать состояние выхода противоположным состоянию входа. В логических цепях возможны два состояния — 1 и 0. Состояние 1 называют *высоким*, для указания, что напряжение в этом состоянии выше, чем в состоянии 0. Состояние 0 называют *низким*, для указания, что напряжение в этом состоянии ниже, чем в состоянии 1. Если 1, или высокое состояние, подано на вход инвертора, на выходе появится низкое состояние, или 0. Если на вход инвертора подать 0, или низкое состояние, то на выходе появится высокое состояние, или 1.

Работу инвертора отражает таблица на рис. 32-5. Вход инвертора обозначен A, а выход $\bar{A}$ (читается «не A»). Черточка над буквой A показывает отрицание A. Поскольку

A	Y
0	1
1	0

Рис. 32-5. Таблица истинности для инвертора.

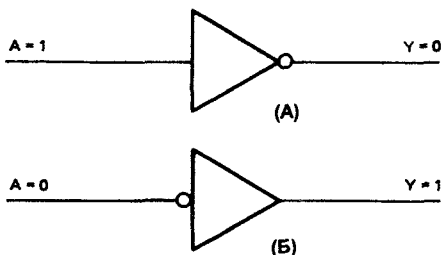


Рис. 32-6. Логические обозначения инвертора.



инвертор имеет только один вход, то возможны только два состояния входа.

Схематическое обозначение инвертора или функции НЕ изображено на рис. 32-6. Треугольник обозначает схему, а кружочек обозначает инверсию или характеризует дополнение. Выбор схематического обозначения зависит от того, где инвертор используется. Если инвертор использует 1 в качестве указателя входа, применяется символ, изображенный на рис. 32-6(А). Если инвертор использует 0 в качестве указателя входа, берется символ, изображенный на рис. 32-6(Б).

32-3. Вопросы

1. Какая операция выполняется цепью НЕ?
2. Изобразите таблицу истинности для цепи НЕ.
3. Нарисуйте схематические обозначения, используемые для цепи НЕ.
4. Почему для изображения цепи НЕ используются два различных символа?

32-4. ЭЛЕМЕНТ НЕ-И

Элемент НЕ-И является комбинацией инвертора и элемента И. Поэтому он и называется НЕ-И. Элемент НЕ-И является наиболее широко используемой логической функцией. Это обусловлено тем, что он может быть использован для создания элемента И, элемента ИЛИ, инвертора или любой комбинации этих функций.

Логическое обозначение элемента НЕ-И изображено на рис. 32-7. На рисунке также показана его эквивалентность последовательно включенным элементу И и инвертору. Кружочек на выходе обозначает инвертирование функции И.

На рис. 32-8 приведена таблица истинности для двухвходового элемента НЕ-И. Заметим, что выход элемента НЕ-И является дополнением выхода элемента И. Подача 0 на любой вход дает на выходе 1. Операция НЕ-И алгебраически

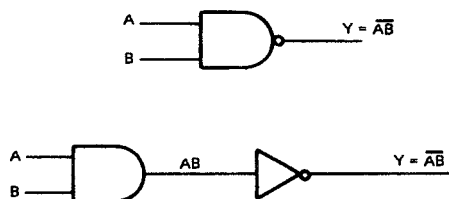


Рис. 32-7. Логические обозначения элемента И-НЕ.

Входы		Выход
A	B	Y
0	0	1
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Рис. 32-8. Таблица истинности для двухвходового элемента И-НЕ.

выражается следующей формулой $Y = \overline{AB}$, где Y — выход, а A и B — входы. Элементы НЕ-И существуют с двумя, тремя, четырьмя, восемью и тринадцатью входами.

Элементы НЕ-И наиболее доступны. Доступность и гибкость элементов НЕ-И позволяет использовать их в качестве элементов других типов. На рис. 32-9 показано, как элементы НЕ-И могут быть использованы для создания других логических функций.

32-4. Вопросы

1. Что такое элемент НЕ-И?
2. Почему элемент НЕ-И так часто используется в цепях?
3. Нарисуйте логический символ, используемый для обозначения элемента НЕ-И.
4. Как алгебраически изображается операция, выполняемая элементом НЕ-И ?
5. Изобразите таблицу истинности для элемента НЕ-И с тремя входами.

32-5. ЭЛЕМЕНТ НЕ-ИЛИ

Элемент НЕ-ИЛИ является комбинацией инвертора и элемента ИЛИ. Поэтому он называется НЕ-ИЛИ. Подобно элементу НЕ-И, элемент НЕ-ИЛИ также может быть использован для создания элемента И, элемента ИЛИ или инвертора.



Логическая функция	Логическое обозначение	Логические функции, использующие только элементы И-НЕ
Инвертор		
И		
или		
или-НЕ		
исключающее или		
или-НЕ		

Рис. 32-9. Использование элемента И-НЕ для создания других логических функций.

Логическое обозначение элемента НЕ-ИЛИ изображено на рис. 32-10. На рисунке также показана его эквивалентная схема, состоящая из последовательно включенных элемента ИЛИ и инвертора. Кругочек на выходе показывает инвертирование функции ИЛИ.

На рис. 32-11 изображена таблица истинности для двух-входового элемента НЕ-ИЛИ. Заметим, что его выход является дополнением выхода элемента ИЛИ. 1 на выходе появляется только тогда, когда на оба входа поданы 0. Если на все входы подана 1, то на выходе будет 0. Операция НЕ-ИЛИ

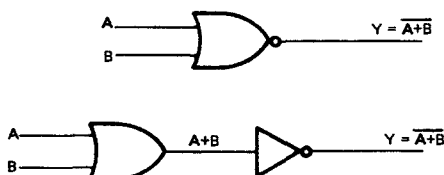


Рис. 32-10. Логические обозначения элемента ИЛИ-НЕ.

Входы		Выход
A	B	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	0

Рис. 32-11. Таблица истинности для двухвходового элемента ИЛИ-НЕ.

алгебраически выражается следующей формулой $Y = \overline{A+B}$, где Y — выход, а A и B — входы. Существуют элементы НЕ-ИЛИ с двумя, тремя, четырьмя и восемью входами.

32-5. Вопросы

1. Что такое элемент НЕ-ИЛИ?
2. Почему элемент НЕ-ИЛИ полезен при проектировании цифровых цепей?
3. Нарисуйте символ, используемый для обозначения элемента НЕ-ИЛИ.
4. Как алгебраически изображается операция, выполняемая элементом НЕ-ИЛИ ?
5. Изобразите таблицу истинности для элемента НЕ-ИЛИ с тремя входами.

32-6. ЭЛЕМЕНТЫ ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ ИЛИ И ИСКЛЮЧАЮЩЕЕ НЕ-ИЛИ

Реже встречающимся, но все же важным элементом является элемент **исключающее ИЛИ**. Элемент исключающее ИЛИ имеет только два входа в отличие от элемента ИЛИ, который может иметь несколько входов. Однако элемент исключающее ИЛИ подобен элементу ИЛИ в том, что он выдает на выходе 1, когда на какой-либо из входов подана 1. Когда же на оба входа подаются 1 или 0, на выходе элемента исключающее ИЛИ будет 0. В то время как при подаче двух 1 на вход элемента ИЛИ на выходе будет 1.



Рис. 32-12. Логическое обозначение элемента исключающее ИЛИ.

Входы		Выход
A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Рис. 32-13. Таблица истинности для элемента исключающее ИЛИ.



Рис. 32-14. Логическое обозначение элемента исключающее ИЛИ-НЕ.

Входы		Выход
A	B	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 32-15. Таблица истинности для элемента исключающее ИЛИ-НЕ.

Схематическое обозначение элемента исключающее ИЛИ изображено на рис. 32-12. На рис. 32-13 изображена таблица истинности для элемента исключающее ИЛИ. Операция исключающее ИЛИ алгебраически выражается следующей формулой $Y = A \oplus B$. Здесь $\oplus$ — символ суммирования по модулю 2.

Дополнением к элементу исключающее ИЛИ является элемент **исключающее ИЛИ-НЕ**. Его схематическое обозначение показано на рис. 32-14. Кружочек на выходе означает инверсию или дополнение. На рис. 32-15 изображена таблица истинности для элемента исключающее ИЛИ-НЕ. Операция исключающее ИЛИ-НЕ алгебраически выражается следующей формулой $Y = A \oplus B$.

32-6. Вопросы

1. В чем различие между элементом ИЛИ и элементом исключающее ИЛИ?



2. Нарисуйте символ, используемый для обозначения элемента исключающее ИЛИ.
3. Изобразите таблицу истинности для элемента исключающее ИЛИ.
4. Нарисуйте символ, используемый для обозначения элемента исключающее ИЛИ-НЕ.
5. Запишите алгебраические выражения для операций исключающее ИЛИ и исключающее ИЛИ-НЕ.

РЕЗЮМЕ

- На выходе элемента И появляется 1 тогда, когда на все его входы поступает сигнал 1.
- Элемент И выполняет операцию логического умножения.
- На выходе элемента ИЛИ появляется 1, если на любой из его входов подана 1.
- Элемент ИЛИ выполняет логическую операцию сложения.
- Элемент НЕ выполняет функцию, которая называется инверсией или отрицанием.
- Элемент НЕ преобразует входное состояние в противоположное выходное состояние.
- Элемент НЕ-И является комбинацией элемента И и инвертора.
- Подача 0 на любой вход элемента НЕ-И дает на выходе 1.
- Элемент НЕ-ИЛИ является комбинацией элемента ИЛИ и инвертора.
- 1 на выходе элемента НЕ-ИЛИ появляется только тогда, когда на оба входа поданы 0.
- 1 на выходе элемента исключающее ИЛИ появляется только тогда, когда уровни его входов различны.
- 1 на выходе элемента исключающее ИЛИ-НЕ появляется только тогда, когда уровни его входов одинаковы.

Глава 32. САМОПРОВЕРКА

1. Нарисуйте схематическое обозначение шестивходового элемента И.



2. Изобразите таблицу истинности для четырехвходового элемента И.
3. Нарисуйте схематическое обозначение шестивходового элемента ИЛИ.
4. Изобразите таблицу истинности для четырехвходового элемента ИЛИ.
5. Каково назначение элемента НЕ?
6. Чем отличается инвертор для входного сигнала от инвертора для выходного сигнала?
7. Нарисуйте схематическое обозначение для восьмивходового элемента НЕ-И.
8. Изобразите таблицу истинности для четырехвходового элемента НЕ-И.
9. Нарисуйте схематическое обозначение для восьмивходового элемента НЕ-ИЛИ.
10. Изобразите таблицу истинности для четырехвходового элемента НЕ-ИЛИ.
11. В чем особенность элемента исключающее ИЛИ?
12. Какое максимальное количество входов может иметь элемент исключающее ИЛИ-НЕ?

Глава 33.

ПРОСТЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Объяснить назначение диаграмм Вейча.
- Описать, как использовать диаграммы Вейча для упрощения Булевских выражений.

Цифровые цепи все больше и больше используются в электронике. Область их применения не ограничивается компьютерами, а распространяется на такие приложения, как техника измерений, автоматическое управление и робототехника. Во всех этих приложениях необходимы сложные переключающие цепи, которые формируются на основе пяти основных логических элементов: И, ИЛИ, И-НЕ, ИЛИ-НЕ и инвертора.

Отличительной чертой всех этих логических элементов является то, что они имеют только два рабочих состояния. Это **ВКЛЮЧЕНО** (1) или **ВЫКЛЮЧЕНО** (0). При соединении логических элементов между собой для формирования более сложных цепей необходимо получить наиболее простую цепь из всех возможных.

Булева алгебра предлагает метод представления сложных переключающих функций в форме уравнений. Булево выражение является уравнением, которое связывает состояние выхода логической цепи с состоянием ее входов. Диаграммы Вейча обеспечивают быстрый и легкий способ приведения логического уравнения к его простейшему виду.

33-1. ДИАГРАММЫ ВЕЙЧА

Диаграммы Вейча обеспечивают быстрый и легкий метод приведения сложных выражений к их простейшей



форме. Они могут быть составлены для двух, трех или четырех переменных. На рис. 33-1 изображено несколько диаграмм Вейча.

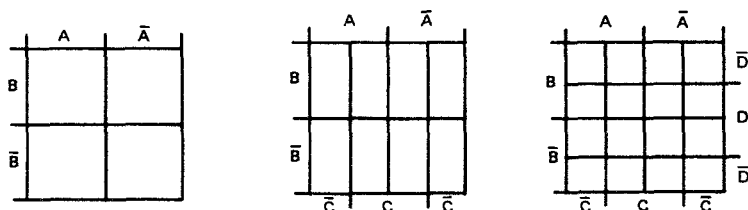


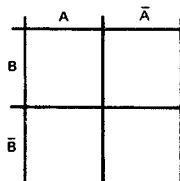
Рис. 33-1. Диаграммы Вейча для двух, трех и четырех переменных.

Для того, чтобы использовать диаграмму Вейча, выполните следующие шаги, которые иллюстрируются на примере.

1. Нарисуйте диаграмму, соответствующую числу переменных.
2. Нанесите на нее логические функции, отмечая их знаком X в соответствующем квадрате.
3. Для получения упрощенной логической функции объедините соседние квадраты, помеченные знаком X в группы по восемь, четыре или два. Продолжайте объединять до тех пор, пока не будут объединены все квадраты, помеченные знаком X.
4. Логически сложите слагаемые (объедините с помощью операции ИЛИ) от каждой петли, одно слагаемое на каждую петлю. (Каждое слагаемое извлекается из диаграммы Вейча и логически суммируется с другими, например $ABC + BCD$.)
5. Запишите упрощенное выражение.

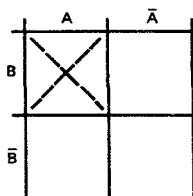
ПРИМЕР: Упростите $AB + \overline{A}B + A\overline{B}$.

Шаг 1. Нарисуем диаграмму Вейча. Мы имеем две переменных A и B, поэтому используем таблицу для двух переменных.

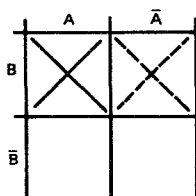


Шаг 2. Нанесем логические функции, пометая их знаком X в соответствующем квадрате.

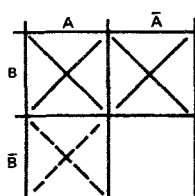
$A B$ + $\bar{A} B$ + $A \bar{B}$
 Первое Второе Третье
 слагаемое слагаемое слагаемое



Пометим первое слагаемое $A B$.



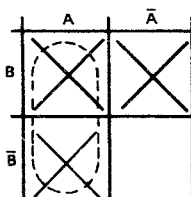
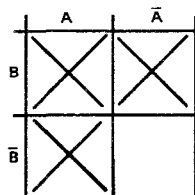
Пометим второе слагаемое $\bar{A} B$.



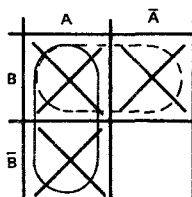
Пометим третье слагаемое $A \bar{B}$.

Шаг 3. Объединим соседние квадраты, помеченные знаком X, в наибольшие возможные группы.

Проанализируем диаграмму — какая возможна наибольшая группа? Наибольшая возможная группа состоит из двух квадратов.



Одна из возможных групп показана штриховой линией.



Другая возможная группа на этой диаграмме показана штриховой линией.



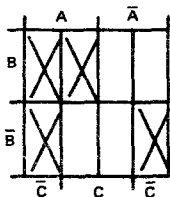
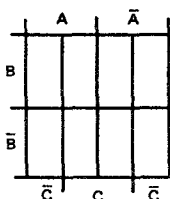
Шаг 4. Логически сложим эти группы (операция ИЛИ): или A, или B = $A + B$.

Шаг 5. Упрощенным выражением для $AB + \bar{A}B + A\bar{B} = Y$ является $A + B = Y$, что получено из диаграммы Вейча.

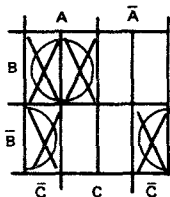
ПРИМЕР: Найдите упрощенное выражение для

$$ABC + AB\bar{C} + \bar{A}BC + \bar{A}\bar{B}C = Y.$$

Шаг 1. Нарисуем диаграмму Вейча для трех переменных.



Шаг 2. Пометим знаком X логические функции каждого слагаемого на диаграмме Вейча.



Шаг 3. Объединим соседние квадраты в наибольшие возможные группы.

Шаг 4. Запишем слагаемые для каждой петли, одно слагаемое на каждую петлю:

$$AB, \quad \bar{B}\bar{C}$$

Шаг 5. Упрощенным выражением является $AB + \bar{B}\bar{C} = Y$.

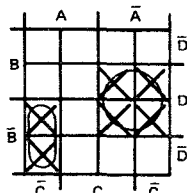
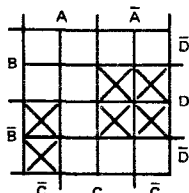
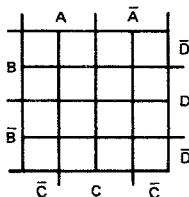
Отметим необычное объединение двух нижних квадратов. Четыре угла диаграммы Вейча считаются связанными, как если бы диаграмма была свернута в шар.

ПРИМЕР: Найдите упрощенное выражение для:

$$\overline{ABCD} + \overline{ABCD} + \overline{ABCD} + \overline{ABCD} + AB\bar{C}D + AB\bar{C}D = Y.$$



Шаг 1. Нарисуем диаграмму Вейча для трех переменных.



Шаг 2. Пометим знаком X логические функции каждого слагаемого на диаграмме Вейча.

Шаг 3. Объединим соседние квадраты в наибольшие возможные группы.

Шаг 4. Запишем слагаемые для каждой петли, одно слагаемое на каждую петлю: $\overline{AD}$, ABC .

Шаг 5. Для получения упрощенного выражения логически сложим полученные слагаемые: $\overline{AD} + ABC = Y$.

33-1. Вопросы

- Какова функция диаграмм Вейча?
- Сколько переменных может быть представлено на диаграмме Вейча?
- Перечислите шаги при использовании диаграммы Вейча.
- Упростите следующие выражения с помощью диаграмм Вейча.
 - $\overline{A}\overline{B}C + \overline{A}BC + A\overline{B}C + A\overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C} = Y$.
 - $\overline{A}BCD + \overline{A}\overline{B}CD + \overline{A}BC\overline{D} + \overline{A}\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}B\overline{C}D + \overline{A}\overline{B}\overline{C}D = Y$.
 - $\overline{A}\overline{B} + \overline{A}BD + \overline{B}CD + \overline{B}\overline{C} + \overline{A}B\overline{C}D = Y$.



РЕЗЮМЕ

- Диаграммы Вейча обеспечивают быстрый и легкий метод приведения сложных логических выражений к их простейшей форме.
- Диаграммы Вейча могут быть составлены для двух, трех или четырех переменных.
- Упрощенные логические выражения получаются из диаграмм Вейча путем объединения помеченных знаком X квадратов в группы из двух, четырех или восьми квадратов и последующего логического сложения объединенных выражений.

Глава 33. САМОПРОВЕРКА

1. Опишите процедуру использования диаграммы Вейча для упрощения логических выражений.
2. Упростите следующее Булево выражение с помощью диаграммы Вейча:

$$\overline{A}BC\overline{D} + A\overline{B}C\overline{D} + \overline{A}C\overline{D} + A\overline{B}C + \overline{A}B + A\overline{B}C\overline{D} = Y.$$

Глава 34.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать функции триггера.
- Перечислить основные типы триггеров.
- Нарисовать схематические обозначения триггеров.
- Описать, как триггеры используются в цифровых цепях.
- Описать, как работает счетчик и сдвиговый регистр.
- Перечислить различные типы счетчиков и сдвиговых регистров.
- Нарисовать схематические обозначения счетчиков и сдвиговых регистров.
- Перечислить применения счетчиков и сдвиговых регистров.

Последовательные логические цепи состоят из цепей, требующих синхронизации и устройств памяти. Основным строительным блоком для последовательных логических цепей являются триггеры. Триггеры могут быть соединены вместе и образовывать счетчики, сдвиговые регистры и устройства памяти.

Триггеры принадлежат к категории цифровых цепей, которые называются мультивибраторами. Мультивибратор — это цепь с положительной обратной связью, имеющая два активных устройства, рассчитанных таким образом, что одно устройство проводит ток, в то время как другое устройство закрыто. Мультивибраторы могут хранить двоичные числа, импульсы счета, синхронизировать арифметические операции и выполнять другие полезные функции в цифровых системах.



Существуют три типа мультивибраторов: бистабильные, моностабильные и астабильные. Бистабильные мультивибраторы называются триггерами.

34-1. ТРИГГЕРЫ

Триггер — это бистабильный мультивибратор, на выходе которого может быть либо высокое, либо низкое напряжение, то есть либо 1, либо 0. На выходе триггера остается высокое или низкое напряжение до тех пор, пока на вход не будет подан пусковой сигнал.

Основным триггером является *RS-триггер*. Он образован двумя перекрестно-связанными элементами НЕ-ИЛИ или НЕ-И (рис. 34-1). **RS-триггер** имеет два выхода Q и $\bar{Q}$ и два управляющих входа, R (Reset — сброс) и S (Set — установка). На выходах триггера уровни всегда противоположны или дополняющие: если $Q = 1$, то $\bar{Q} = 0$ и наоборот.

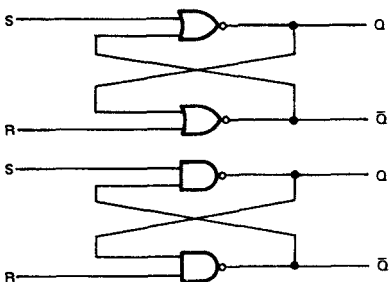


Рис. 34-1. Основная схема триггера.

Для того чтобы понять работу цепи, предположим что выход Q , вход R и вход S имеют низкий уровень сигнала. Низкий уровень выхода Q связан с одним из входов элемента 2. На входе S также низкий уровень сигнала. На выходе элемента 2 высокий уровень. Этот высокий уровень связан со входом элемента 1, удерживая его выход на низком уровне. Когда на выходе Q появляется низкий уровень, говорят, что триггер находится в исходном состоянии (RESET). Он остается в этом состоянии неопределенно долго, до тех пор, пока на вход S элемента 2 не будет подан высокий уровень. Когда это произойдет, на выходе



элемента 2 появится низкий уровень, а он связан со входом элемента 1. Поскольку на входе R элемента 1 низкий уровень, на его выходе низкий уровень изменится на высокий. Этот высокий уровень связан со входом элемента 2, обеспечивая на выходе $\bar{Q}$ низкий уровень. Когда на выходе Q высокий уровень, говорят, что триггер находится в единичном (SET) состоянии. Он остается в этом состоянии до тех пор, пока на вход R не будет подан высокий уровень, переводящий триггер в исходное состояние.

«Недопустимое» или «неразрешенное» состояние имеет место, когда одновременно на оба входа, R и S , подается высокий уровень. В этом случае выходы Q и $\bar{Q}$ пытаются перейти в низкое состояние, но Q и $\bar{Q}$ не могут быть одновременно в одинаковом состоянии без нарушения работы триггера. При одновременном отключении высокого уровня со входов R и S , оба выхода пытаются перейти в состояние с высоким уровнем. Поскольку всегда логические элементы немного отличаются друг от друга, то один из них перейдет в состояние с высоким уровнем раньше. Это заставит другой элемент перейти в состояние с низким уровнем. В этом случае имеет место непредсказуемый режим работы и, следовательно, состояние выходов триггера не может быть определено.

На рис. 34-2 изображена таблица истинности для работы RS-триггера. На рис. 34-3 изображено упрощенное схематическое обозначение RS-триггера.

Другим типом триггера является **триггер с синхронизирующим входом**. Он отличается от RS-триггера тем, что

Входы		Выходы	
S	R	Q	$\bar{Q}$
0	0	NC	NC
0	1	0	1
1	0	1	0
1	1	?	?

NC = не изменяется

Рис. 34-2. Таблица истинности для RS-триггера.

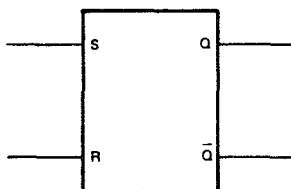


Рис. 34-3 Логическое обозначение RS-триггера.



для его работы необходим дополнительный вход. Третий вход называется тактовым (или синхронизирующим) входом (CLK). На рис. 34-4 изображена логическая схема триггера с синхронизирующим входом. Сигнал высокого уровня на любом из входов входного блока триггера активизирует триггер, заставляя его изменить состояние. Входной блок, называемый «управляющим элементом», управляет или направляет тактовые импульсы на входы элементов триггера.

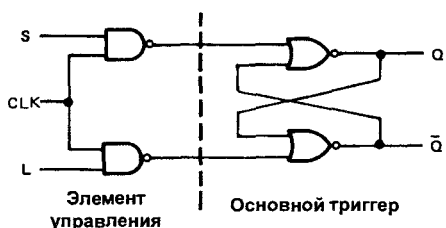


Рис. 34-4. Логическая схема тактируемого RS-триггера.

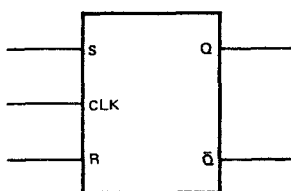


Рис. 34-5. Логическое обозначение тактируемого RS-триггера.

Триггер с синхронизирующим входом управляется логическими состояниями входов R и S при наличии тактового импульса. Изменение состояния триггера происходит только по переднему фронту тактового импульса. Передний фронт тактового импульса — это переход в положительном направлении (от низкого к высокому), что означает возрастание амплитуды импульса от нулевого напряжения до положительного значения. Это называется запуск по положительному фронту (фронту импульса, запускающему цепь).

Пока уровень на тактовом входе низкий, уровни входов R и S могут изменяться, не влияя на состояние триггера. Входы R и S становятся чувствительными только в течение тактового импульса. Это называется синхронной работой. Триггер работает синхронно с тактовым сигналом. Синхронная работа важна в компьютерах и калькуляторах, когда каждый шаг выполняется в определенном порядке. На рис. 34-5 изображен логический символ, используемый для обозначения тактируемого RS-триггера.



D-триггер полезен, когда должен быть сохранен только один бит данных (1 или 0). На рис. 34-6 изображена логическая схема D-триггера. Он имеет один вход для данных и вход для тактовых импульсов. *D-триггер* также называют *триггером с задержкой*. Вход D задерживает один тактовый импульс перед изменением уровня выхода (Q). Иногда D-триггер имеет вход PS (предустановка) и вход CLR (очистка). Когда на вход предустановки подан низкий уровень (0), он устанавливает выход Q в состояние 1. Когда на вход очистки подан 0, Q также устанавливается 0. D-триггеры, соединенные вместе, образуют сдвиговые регистры и регистры памяти. Эти регистры широко используются в цифровых системах.

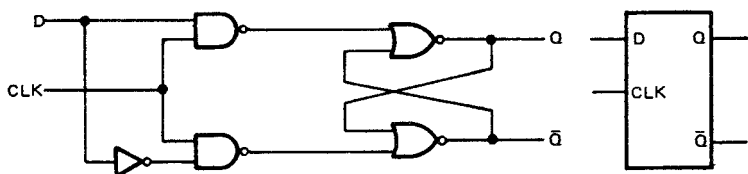


Рис. 34-6. Логическая схема и обозначение D-триггера.

Наиболее широко используемый триггер — это **JK-триггер**. Он обладает всеми особенностями триггеров других типов. Логическая схема и обозначение JK-триггера показаны на рис. 34-7. J и K — это входы. Важная особенность JK-триггера состоит в том, что при подаче на оба входа J и K высокого уровня сигнала, повторяющиеся тактовые импульсы заставляют выход переключаться или изменять состояние. Два асинхронных входа, PS (предустановка) и CLR (очистка), блокируют синхронные входы, входы данных J и K и вход тактовых импульсов. JK-триггеры ши-

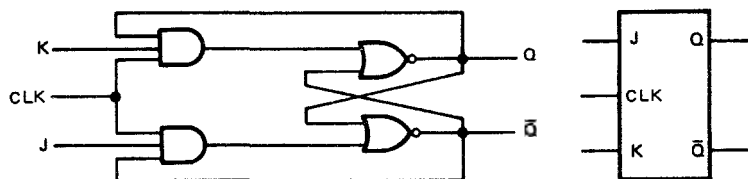


Рис. 34-7. Логическая схема и обозначение JK-триггера.



роко используются во многих цифровых цепях, особенно в схемах счетчиков. Счетчики можно найти почти в каждой цифровой системе.

Защелка — это устройство, служащее временным буфером памяти. Оно используется для сохранения данных после удаления входного сигнала. D-триггер является хорошим примером защелки. Для защелки также могут быть применены другие типы триггеров.

Защелка используется на входах семисегментных индикаторов. Без защелки изображенная информация будет исчезать вместе с исчезновением входного сигнала. При наличии защелки информация сохранится на экране до тех пор, пока не будет обновлена.

На рис. 34-8 изображена 4-разрядная защелка. Это устройство содержит 4 D-триггера, заключенных в один корпус интегральной микросхемы. Входы Е (разрешение) подобны тактовому входу D-триггера. Данные фиксируются, когда уровень на входе разрешения становится низким, то

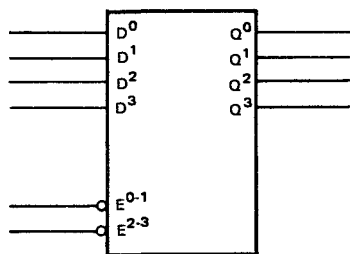


Рис. 34-8. Четырех-разрядная защелка.

есть равным 0. Когда уровень на входе разрешения высокий, или 1, уровни выходов повторяют уровни входов. Это означает, что выход будет изменяться при любом изменении состояния входа; например, если на входе высокий уровень, то на выходе тоже появится высокий уровень; если на входе низкий

уровень, то на выходе тоже появится низкий уровень. В таком состоянии защелка называется *прозрачной*.

34-1. Вопросы

1. Что такое триггер?
2. Каковы различные типы триггеров?
3. Что такое синхронизируемый триггер?



4. В чем отличие между асинхронным входом и синхронным входом?
5. Что такое защелка?

34-2. СЧЕТЧИКИ

Счетчик — это логическая схема, способная считать последовательность чисел или состояний при активизации тактовым импульсом. Выход счетчика показывает двоичное число, хранящееся в счетчике в любой данный момент времени. Количество отсчетов, которое совершает счетчик перед возвращением в исходное состояние, называется коэффициентом счета счетчика.

Триггер может работать как простой счетчик, будучи соединенным, как показано на рис. 34-9. Предположим, что сначала триггер находится в исходном состоянии. Тогда первый тактовый импульс установит его в единичное состояние ($Q = 1$). Второй тактовый импульс переведет триггер в исходное состояние ($Q = 0$). Поскольку триггер имеет два состояния, то он может определить только два уровня тактовых импульсов.

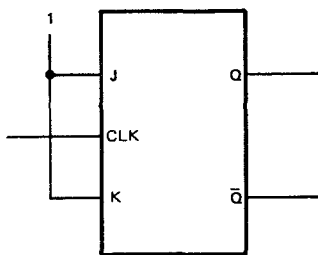


Рис. 34-9. JK-триггер, установленный для счета.

На рис. 34-10 изображена форма выходных импульсов триггера. Заметим, что уровень на выходе Q высокий (1) после каждого нечетного импульса, и низкий (0) после каждого четного импульса. Следовательно, когда на выходе

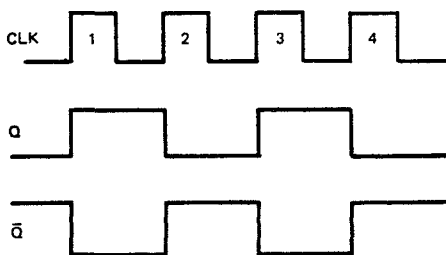


Рис. 34-10. Форма входных и выходных импульсов JK-триггера, установленного для счета.



высокий уровень, прошло нечетное количество импульсов. Когда на выходе низкий уровень, импульсов либо не было вообще, либо прошло их четное количество. Какой из этих случаев имел место — неизвестно.

Простой триггер имеет ограниченную последовательность счета, 0 и 1. Для увеличения емкости счетчика необходимы дополнительные триггеры. Максимальное количество двоичных состояний, которым может обладать счетчик, зависит от количества триггеров в счетчике. Оно может быть выражено следующей формулой:

$$N = 2^n,$$

где N — максимальное количество состояний счетчика, n — количество триггеров в счетчике.

Двоичные счетчики делятся на две категории: асинхронные и синхронные, в зависимости от того, как используется последовательность тактовых импульсов.

Асинхронный означает неодновременный. По отношению к операциям счета асинхронность означает, что триггеры изменяют свое состояние неодновременно. Это обусловлено тем, что источник тактовых импульсов не соединен с тактовым входом каждого разряда. На рис. 34-11 изображен двухразрядный счетчик, соединенный для работы в асинхронном режиме. Каждый триггер счетчика называется *разрядом*.

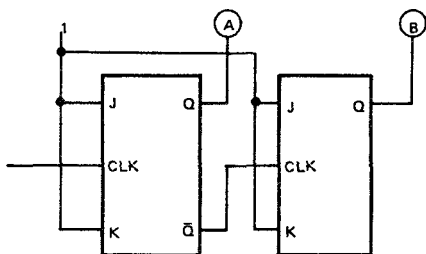


Рис. 34-11. Двухразрядный счетчик.

Заметим, что выход $\bar{Q}$ первого разряда связан с тактовым входом второго разряда. Второй разряд изменяет свое состояние только при изменении состояния выхода первого разряда. Вследствие задержки сигнала триггером, второй

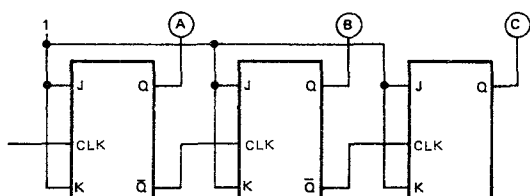


триггер изменяет свое состояние одновременно с подачей тактового импульса. Следовательно, два триггера переключаются одновременно, что является результатом асинхронного режима работы.

Асинхронные счетчики обычно называют *счетчиками пульсаций*. Входной тактовый импульс сначала принимает первый триггер. Второй триггер не реагирует на сигнал в тот же самый момент, вследствие его задержки первым триггером. В многоразрядном счетчике задержка имеет место на каждом триггере, так что влияние входного тактового импульса как бы «пульсирует» проходя через счетчик. На рис. 34-12 изображен трехразрядный двоичный счетчик и графики синхронизации для каждого разряда. Для отображения счетной последовательности приведена таблица истинности.

Синхронный означает одновременный. *Синхронный счетчик* — это счетчик, в котором все разряды получают тактовый импульс одновременно, что достигается параллельным соединением их тактовых входов (рис. 34-13). Синхронный счетчик также называют *параллельным счетчиком*, так как тактовые входы всех триггеров соединены параллельно.

Синхронный счетчик работает следующим образом. Сначала счетчик устанавливается в исходное состояние, при этом оба триггера имеют на выходе состояние 0. Когда подается первый тактовый импульс, первый триггер переключается, и на его выходе появляется высокий уровень сигнала. Второй триггер не переключается вследствие задержки между подачей входного сигнала и реальным изменением состояния выхода. Следовательно, выходное состояние второго триггера не изменяется. Когда подается второй тактовый импульс, первый триггер переключается, и на его выходе появляется низкий уровень. Поскольку на входе второго триггера был высокий уровень, он переключается, и на его выходе появляется высокий уровень. После четырех тактовых импульсов счетчик вернется в исходное состояние. На рис. 34-14 изображена временная диаграмма



Количество тактовых импульсов	Двоичная последовательность счета			Десятичный счет
	В	А	С	
0	1	1	1	7
1	1	1	0	6
2	1	0	1	5
3	1	0	0	4
4	0	1	1	3
5	0	1	0	2
6	0	0	1	1
7	0	0	0	0
8	1	1	1	7



Рис. 34-12. Трехразрядный двоичный счетчик.

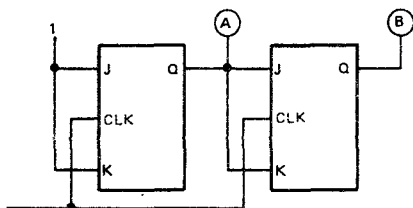
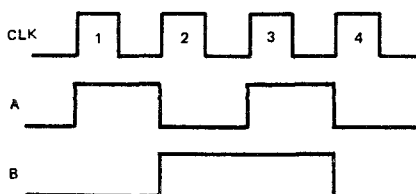


Рис. 34-13. Двухразрядный синхронный счетчик.

Рис. 34-14. Форма входных и выходных импульсов двухразрядного синхронного счетчика.

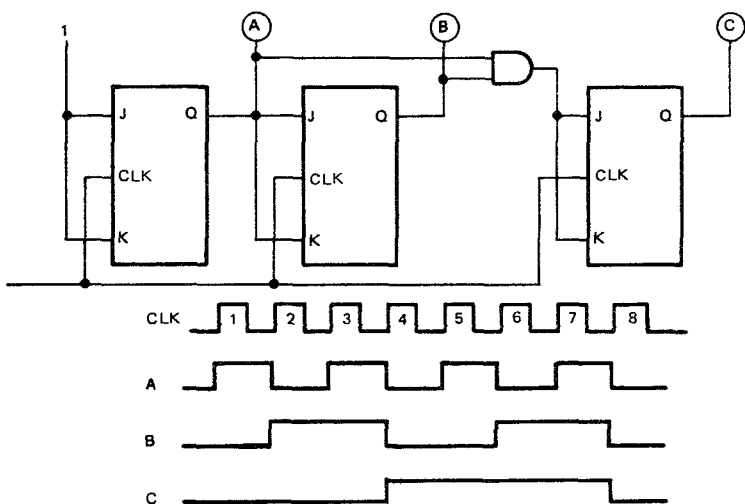




работы двухразрядного синхронного счетчика для четырех тактовых импульсов.

На рис. 34-15 изображен трехразрядный двоичный счетчик и временная диаграмма его работы. На рис. 34-16 изображен четырехразрядный двоичный счетчик и его логическое обозначение.

Одним из применений счетчиков является деление частоты. Простой триггер выдает один импульс на каждые два входных импульса. Следовательно, он является устрой-



Количество так- товых импульсов	Двоичная последовательность счета			Десятич- ный счет
	В	А	С	
0	0	0	0	0
1	0	0	1	1
2	0	1	0	2
3	0	1	1	3
4	1	0	0	4
5	1	0	1	5
6	1	1	0	6
7	1	1	1	7
8	0	0	0	8

Рис. 34-15. Трехразрядный двоичный счетчик и временная диаграмма.

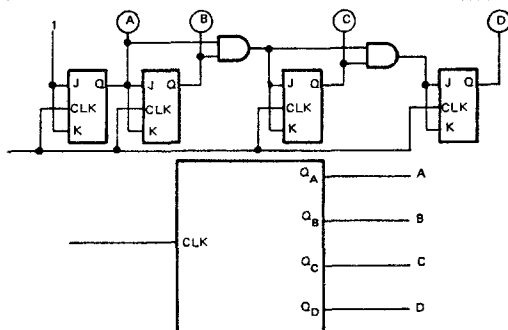


Рис. 34-16. Логическая схема и обозначение четырехразрядного синхронного счетчика.

ством для деления на 2, выходная частота которого вдвое меньше входной. Двухразрядный двоичный счетчик является устройством деления на 4, выходная частота которого вчетверо меньше входной тактовой частоты. Четырехразрядный двоичный счетчик является устройством деления на 16, выходная частота которого в 16 раз меньше входной тактовой частоты (рис. 34-17).

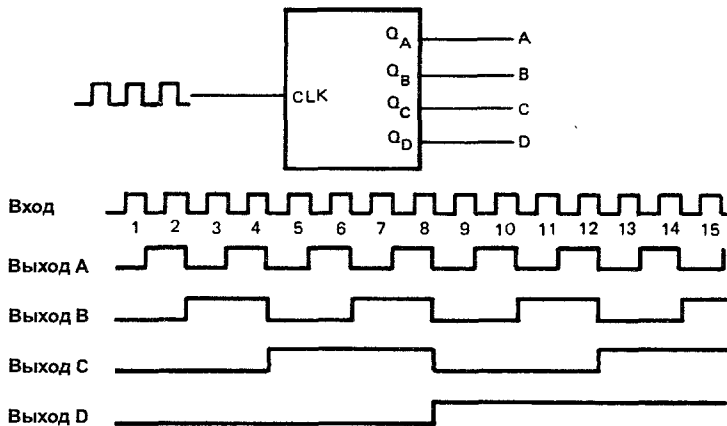


Рис. 34-17. Счетчик в качестве делителя частоты.

Двоичный счетчик с n разрядами делит тактовую частоту на 2^n . Трехразрядный счетчик делит тактовую частоту на 8 (2^3), четырехразрядный на 16 (2^4), пятиразрядный на 32 (2^5) и т.д. Заметим, что коэффициент счета счетчика равен коэффициенту деления частоты.

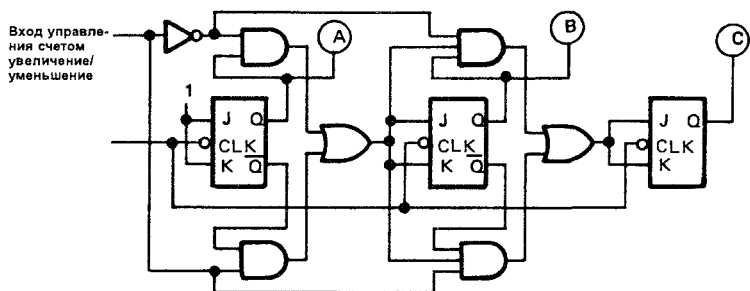


Рис. 34-21. Логическая схема двоично-десятичного реверсивного счетчика.

На рис. 34-21 показана логическая схема реверсивного двоично-десятичного счетчика. Входы JK-триггеров управляются входом переключения направления счета через логические элементы.

Счетчики могут быть остановлены после любой счетной последовательности с помощью логического элемента или комбинации логических элементов. С выхода логического элемента подается обратная связь на вход первого триггера в счетчике пульсаций. Если обратная связь подает 0 на вход JK первого триггера (рис. 34-22), то это препятствует переключению первого триггера и, следовательно, останавливает счет.

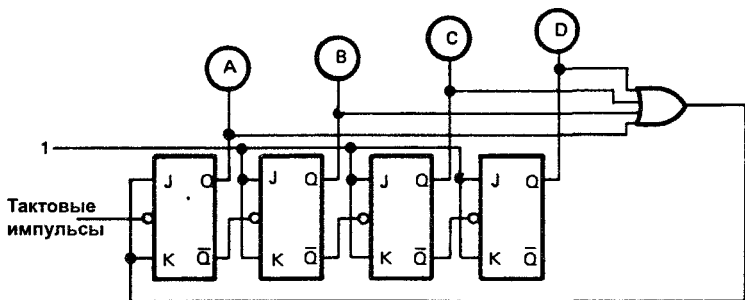


Рис. 34-22. Низкий уровень, поданный на вход JK первого триггера, препятствует его переключению и останавливает счет.



34-2. Вопросы

1. Для чего служит счетчик?
2. Каков размер счетной последовательности восьмиразрядного счетчика?
3. Как работает асинхронный счетчик?
4. Чем синхронный счетчик отличается от асинхронного счетчика?
5. Как можно остановить счетчик в любой момент счета?

34-3. СДВИГОВЫЕ РЕГИСТРЫ

Сдвиговый регистр — это последовательная логическая цепь, широко используемая для временного хранения данных. Данные могут быть загружены в сдвиговый регистр и удалены оттуда либо в параллельной, либо в последовательной форме. На рис. 34-23 показаны четыре различных метода загрузки и чтения данных в сдвиговом регистре. Благодаря их способности перемещать данные по одному биту из одного места хранения в другое, сдвиговые регистры полезны при выполнении различных логических операций.

Сдвиговые регистры состоят из соединенных между собой триггеров. Триггеры обладают всеми функциями, необходимыми для регистра: их можно установить в исходное состояние, предустановить, переключить или управ-

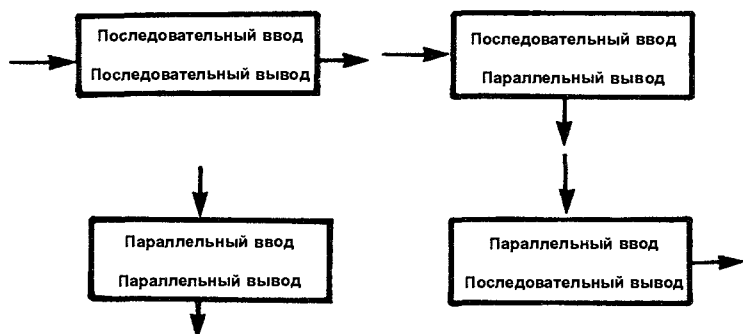


Рис. 34-23. Методы загрузки и чтения данных в сдвиговом регистре.



лять уровнями 1 или 0. На рис. 34-24 изображен основной сдвиговый регистр, состоящий из четырех триггеров. Он называется четырехразрядным сдвиговым регистром, так как состоит из четырех двоичных элементов хранения информации.

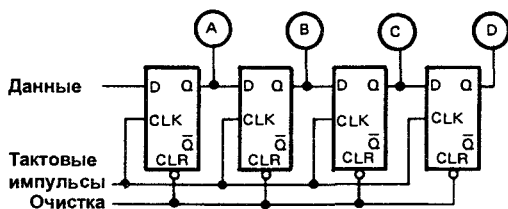


Рис. 34-24. Сдвиговый регистр, составленный из четырех триггеров.

Важной особенностью сдвигового регистра является то, что он может перемещать данные вправо и влево по отношению к исходному положению разрядов. Это эквивалентно умножению или делению записанного числа на определенный множитель. Данные сдвигаются на один разряд при подаче каждого тактового импульса. Тактовые импульсы полностью управляют работой сдвигового регистра.

На рис. 34-25 изображен типичный 4-разрядный сдвиговый регистр, состоящий из JK-триггеров. Последовательные данные и их дополнения подаются на JK входы триггера А. Остальные триггеры соединены каскадно, то есть выходы одного подсоединены ко входам следующего. Переключатели всех триггеров соединены вместе, и по этой линии подаются тактовые импульсы. Поскольку все триггеры переключаются одновременно — цепь является синхронной. Кроме того, входы очистки каждого триггера соединены вместе и образуют линию сброса. Данные, поданные

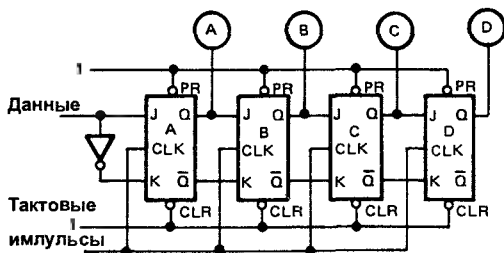


Рис. 34-25. Типичный сдвиговый регистр, составленный из JK-триггеров.



гут быть загружены в сдвиговый регистр. Для работы с данными в параллельном коде входные данные предуславливаются в сдвиговом регистре. Когда данные находятся в сдвиговом регистре, они могут быть последовательно выдвинуты, как было описано ранее.

Для преобразования данных из последовательной формы представления в параллельную, они сначала помещаются в сдвиговый регистр с помощью тактовых импульсов. Когда данные находятся в сдвиговом регистре, выходы отдельных триггеров контролируются одновременно, и данные направляются по назначению.

Сдвиговые регистры могут выполнять арифметические операции, такие как умножение или деление. Сдвиг двоичного числа, хранящегося в сдвиговом регистре, вправо, дает такой же эффект, что и деление этого числа на некоторую степень 2. Сдвиг двоичного числа, хранящегося в сдвиговом регистре, влево, дает такой же эффект, что и умножение этого числа на некоторую степень 2. Сдвиговые регистры предоставляют простой и недорогой способ выполнения умножения и деления чисел.

Сдвиговые регистры часто используются для временного хранения данных. Сдвиговые регистры, используемые для хранения данных, способны хранить одно или более двоичных слов. Для сдвиговых регистров, применяемых для этих целей, существуют три требования: во-первых, он должен быть в состоянии принимать и хранить данные, во-вторых, быть способен находить и читать эти данные по команде и, в-третьих, когда данные прочитаны, они не должны быть потеряны. На рис. 34-28 изображены внешние

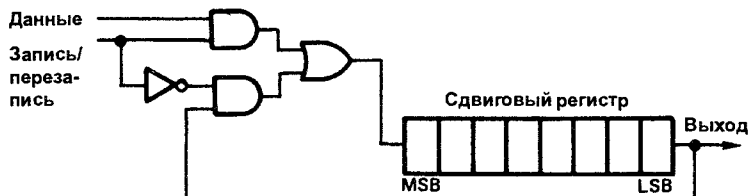


Рис. 34-28. Внешние цепи сдвигового регистра для обслуживания и чтения данных.



цепи, позволяющие сдвиговому регистру читать и обслуживать данные, хранящиеся в нем. Когда на линии чтения/записи высокий уровень, она позволяет поместить в сдвиговый регистр новые данные. После того, как данные помещены в регистр, уровень на линии чтения/записи становится низким, открывая элемент 2, позволяющий данным перезаписаться во время их чтения.

34-3. Вопросы

1. Каковы функции сдвигового регистра?
2. Что является важной особенностью сдвигового регистра?
3. Из каких логических элементов состоят сдвиговые регистры?
4. Где чаще всего применяются сдвиговые регистры?
5. Какие арифметические операции может выполнять сдвиговый регистр, и как он их выполняет?

РЕЗЮМЕ

- Триггер — это бистабильный мультивибратор, на выходе которого может быть либо низкий, либо высокий уровень сигнала.
- Триггеры бывают следующих типов:
 - а. RS;
 - б. тактируемый RS;
 - в. D;
 - г. JK.
- Триггеры используются в цифровых цепях в качестве счетчиков.
- Защелка — это временный буфер памяти.
- Счетчик — это логическая цепь, которая может считать последовательность чисел или состояний.
- Один триггер может сосчитать последовательность из двух чисел, 0 и 1.
- Максимальное число двоичных состояний счетчика может зависеть от количества триггеров, содержащихся в счетчике.



- Счетчики могут быть либо синхронными, либо асинхронными.
- Асинхронные счетчики называют счетчиками пульсаций.
- Синхронные счетчики тактируют все каскады одновременно.
- Сдвиговые регистры используются для временного хранения данных.
- Сдвиговые регистры состоят из соединенных вместе триггеров.
- Сдвиговые регистры могут перемещать данные влево или вправо.
- Сдвиговые регистры используются для преобразования данных из последовательной формы представления в параллельную, и наоборот.
- Сдвиговые регистры могут выполнять умножение и деление.

Глава 34. САМОПРОВЕРКА

1. Опишите, как RS-триггер изменяет состояния с высокого на выходе Q на высокое на выходе $\overline{Q}$.
2. В чем главное отличие D-триггера от тактируемого RS-триггера?
3. Из каких компонентов состоит счетчик, и как он сконструирован?
4. Нарисуйте схему счетчика, который считает до 10 и после этого повторяет счет.
5. Чем сдвиговый регистр отличается от счетчика?
6. Какие функции выполняет и для чего может использоваться сдвиговый регистр?

Глава 35. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Описать функции шифраторов, дешифраторов, мультиплексоров, сумматоров, вычитающих устройств и компараторов.
- Различать схематические обозначения шифраторов, дешифраторов, мультиплексоров, сумматоров, вычитающих устройств и компараторов.
- Перечислить применения комбинационных логических схем.
- Начертить таблицы истинности для различных комбинационных логических схем.

Комбинационные логические схемы — это схемы, состоящие из комбинаций элементов И, ИЛИ, инверторов и образующие более сложные схемы. Выход комбинационных логических схем является функцией состояний их входов, типов использованных элементов и их соединений между собой. Наиболее часто встречающимися комбинационными логическими схемами являются шифраторы, дешифраторы, мультиплексоры и арифметические схемы.

35-1. ШИФРАТОРЫ

Шифратор — это комбинационная логическая схема, имеющая один или более входов и создающая многоразрядный двоичный выход. *Шифрование* — это процесс преобразования любого символа клавиатуры или числа, поданного на вход в кодированный выход в двоичном или двоично-десятичном коде.

На рис. 35-1 изображен *десятично-двоичный шифратор*, называемый шифратором на «4». Его функция состоит в

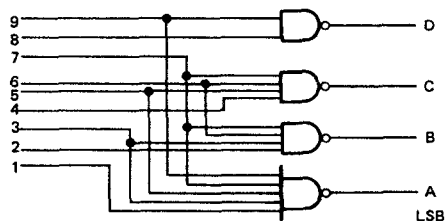


Рис. 35-1. Десятично-двоичный шифратор.

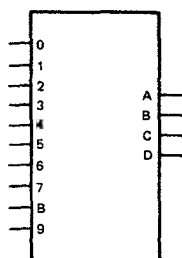


Рис. 35-3. Логическое обозначение десятично-двоичного шифратора с приоритетом.

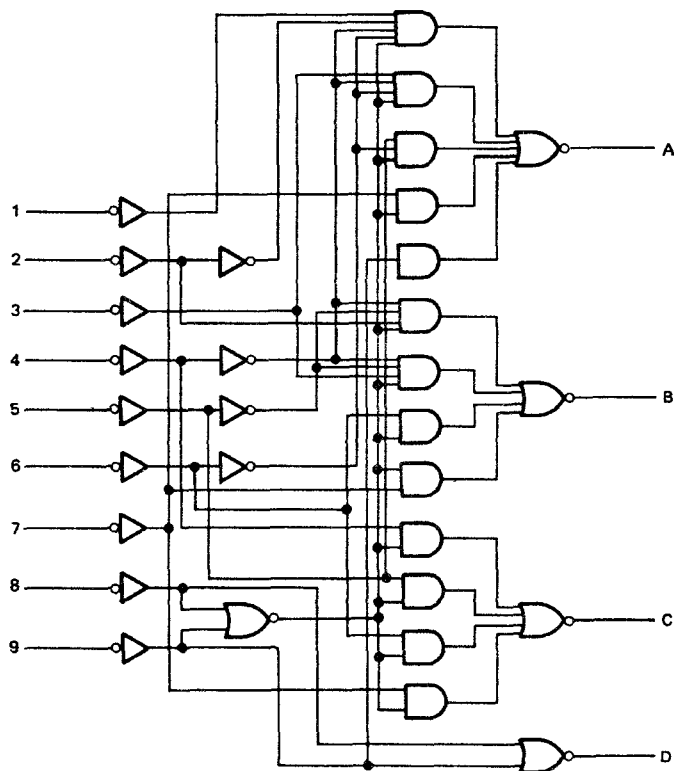


Рис. 35-2. Десятично-двоичный шифратор с приоритетом.



преобразовании отдельной цифры (от 0 до 9), поданной на вход, в четырехразрядный двоичный код на выходе. Это означает, что если на клавиатуре нажата цифра 4, то на вход 4 будет подан высокий уровень, или 1, а на выходе появится 4-разрядный код 0100.

На рис. 35-2 изображен десятично-двоичный приоритетный шифратор. Функция приоритета означает, что если две клавиши нажаты одновременно, то шифратор выдаст двоично-десятичный код, соответствующий большей десятичной цифре. Например, если на шифратор подать одновременно цифры 2 и 5, то он выдаст двоично-десятичный код 0101, соответствующий цифре 5. Шифраторы этого типа встроены в одну интегральную микросхему и состоят примерно из 30 логических элементов. На рис. 35-3 изображено логическое обозначение шифратора с приоритетом.

Шифраторы этого типа используются для преобразования десятичных чисел с клавиатуры в двоично-десятичный код 8421. Десятично-двоичный шифратор и десятично-двоичный приоритетный шифратор всегда можно найти там, где есть ввод с клавиатуры. Это калькуляторы, клавиатуры компьютеров, электронные пишущие машинки и телетайпы.

35-1. Вопросы

1. Что такое шифрование?
2. Что делает шифратор?
3. В чем разница между обычным шифратором и приоритетным шифратором?
4. Нарисуйте логическое обозначение десятично-двоичного приоритетного шифратора.
5. Где применяются десятично-двоичные шифраторы?

35-2. ДЕШИФРАТОРЫ

Дешифратор — это одна из наиболее используемых комбинационных логических схем. Он преобразует сложный двоичный код в распознаваемую цифру или символ.



Например, он может дешифровать число в двоично-десятичном коде в одну из десяти возможных десятичных цифр. Выход такого дешифратора используется для работы цифрового отсчета или дисплея. Дешифратор этого типа называется дешифратор 1 на 10 или дешифратор 4 линии на 10-линий.

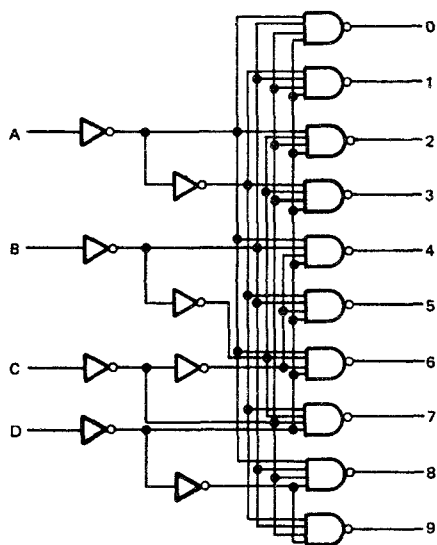


Рис. 35-4 Двоично-десятичный дешифратор.

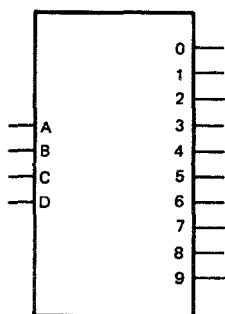


Рис. 35-5. Логическое обозначение двоично-десятичного дешифратора.

На рис. 35-4 изображены десять элементов НЕ-И, требующихся для дешифрации 4-разрядного числа в двоично-десятичном коде в десятичную цифру. Когда на всех входах элемента НЕ-И высокий уровень, на его выходе 0. На всех других выходах элементов НЕ-И дешифратора — высокие уровни. Для того, чтобы каждый раз не рисовать все логические элементы цепи, используется обозначение, показанное на рис. 35-5.

Два других типа дешифраторов — это дешифратор с восемью выходами и дешифратор с шестнадцатью выходами (рис. 35-6). Дешифратор с восемью выходами преобразует входное трехразрядное слово в напряжение на одном

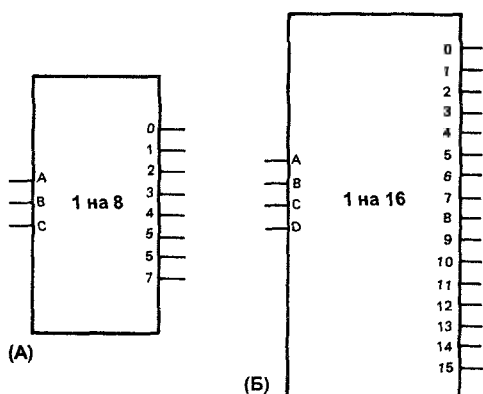


Рис. 35-6. Логические обозначения дешифраторов 1 на 8 (А) и 1 на 16 (Б).

из восьми выходов. Дешифратор с шестнадцатью выходами преобразует входное четырехразрядное слово в напряжение на одном из шестнадцати выходов. Его также называют дешифратор 4 линии-на-10-линий.

Специальным типом дешифратора является дешифратор стандартного двоично-десятичного кода в коды семи-сегментного индикатора. Он преобразует двоично-десятичный код в специальный 7-разрядный код, обеспечивающий работу семисегментного индикатора, отображающего десятичные цифры (рис. 35-7). Индикатор состоит из семи светодиодных сегментов, которые загораются в различных комбинациях, отображая каждую из десяти десятичных цифр, от 0 до 9 (рис. 35-8). Кроме семисегментных светодиодных индикаторов существуют индикаторы накаливания, люминесцентные и жидкокристаллические индикаторы.

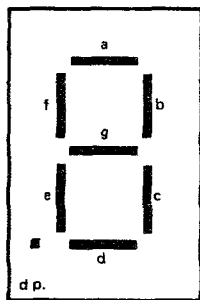


Рис. 35-7. Конфигурация семисегментного индикатора.

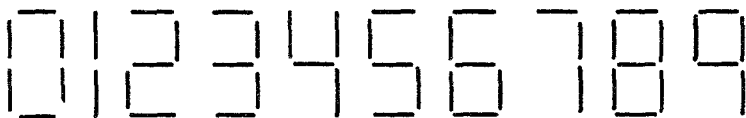


Рис. 35-8. Использование семисегментного индикатора для отображения десятичных цифр.

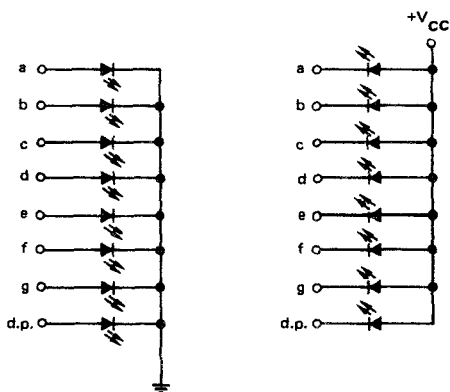


Рис. 35-9. Два различных типа светодиодных индикаторов.

Работа каждого из этих индикаторов основана на одном принципе. Сегмент активируется либо высоким, либо низким уровнем напряжения. На рис. 35-9 изображены два типа светодиодных индикаторов: с общим анодом и с общим катодом. В каждом случае светодиодный сегмент должен быть смещен в прямом направлении для того, чтобы

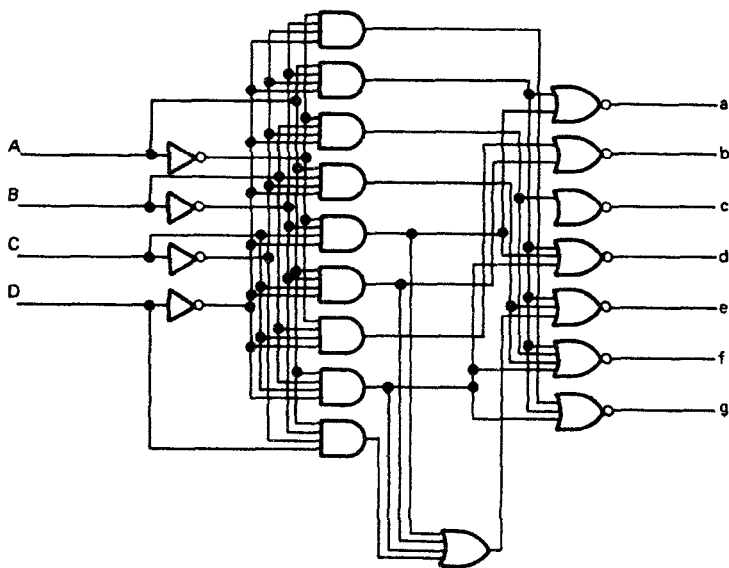


Рис. 35-10. Дешифратор двоичного кода в код семисегментного индикатора.



он излучал свет. В случае с общим катодом, при высоком уровне (1) сегмент светится, а при низком (0) — нет.

На рис. 35-10 изображена декодирующая логическая цепь, преобразующая двоично-десятичный код в код семи-

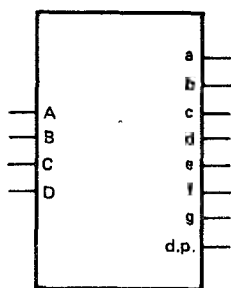


Рис. 35-11. Логическое обозначение дешифратора двоично-десятичного кода в код семисегментного индикатора.

сегментного индикатора. Обращаясь к рис. 35-7, заметим, что сегмент **a** светится для цифр 0, 2, 3, 5, 7, 8 и 9; сегмент **b** светится для цифр 0, 1, 2, 3, 4, 7, 8 и 9 и т. д. Для определения логической схемы, необходимой для зажигания каждого сегмента дисплея, могут быть записаны выражения Булевых функций. Логическое обозначение дешифратора двоично-десятичного кода в код семисегментного индикатора изображено на рис. 35-11, — это цепь, содержащая в интегральной микросхеме.

35-2. Вопросы

1. Что такое дешифратор?
2. Для чего используются дешифраторы?
3. Нарисуйте логическое обозначение дешифратора 1 на 10.
4. Для чего предназначен дешифратор двоично-десятичного кода в код семисегментного индикатора?
5. Какие коды могут использоваться в дешифраторах?

35-3. МУЛЬТИПЛЕКСОРЫ

Мультиплексор — это цепь, используемая для выбора и передачи на выход одного из нескольких входных сигналов. Например, неэлектронным мультиплексором является однополюсный многопозиционный переключатель (рис. 35-12).

Многопозиционные переключатели широко используются в электронных цепях. Однако в цепях, работающих с высокими скоростями, требуются мультиплексоры для автоматического выбора и высокоскоростного переключения.

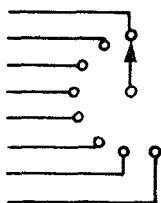


Рис. 35-12. Однополюсный, многопозиционный переключатель, используемый в качестве мультиплексора в неэлектронных цепях.

Механическое переключение не может удовлетворительно выполнить эту задачу. Следовательно, мультиплексоры, используемые для выполнения высокоскоростного переключения, должны состоять из электронных компонентов.

Мультиплексоры имеют дело с данными двух типов: аналоговыми и цифровыми. Мультиплексоры для аналоговых сигналов состоят из реле и транзисторных ключей. Мультиплексоры для цифровых сигналов состоят из стандартных логических элементов.

Цифровые мультиплексоры позволяют направлять цифровые данные от отдельных источников в общую линию для передачи по назначению. Типичный мультиплексор имеет несколько входов и один выход. Входы мультиплексора активируются входом выбора данных, определяющих вход, по которому данные будут приниматься. На рис. 35-13 изображена логическая схема восьмивходового мультиплексора. Заметим, что мультиплексор имеет три линии управления входами, обозначенные А, В и С. Путем подачи соответствующего двоичного кода на линии управления, может быть выбран любой из восьми входов. Обозначение цифрового мультиплексора показано на рис. 35-14.

На рис. 35-15 изображено обозначение 16-входового мультиплексора. Заметим, что мультиплексор имеет четыре линии управления для активации шестнадцати входов данных.

Кроме селекции потоков данных, мультиплексоры широко используются для преобразования данных из параллельного кода в последовательный. Двоичное слово, представленное параллельным кодом, подается на вход мультиплексора. Подавая на управляющие входы последовательность разрешающих кодов, можно получить на выходе

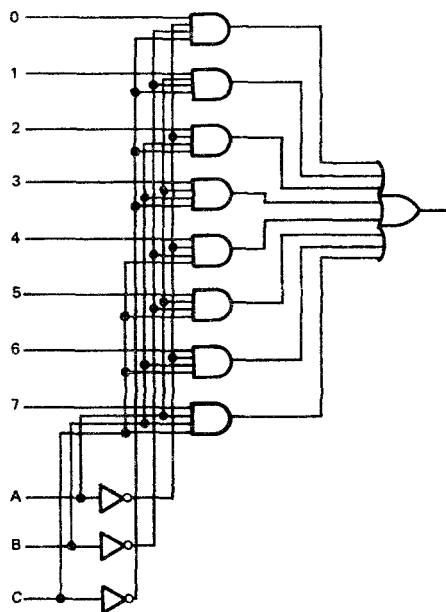


Рис. 35-13. Логическая схема восьмивходового мультиплексора.

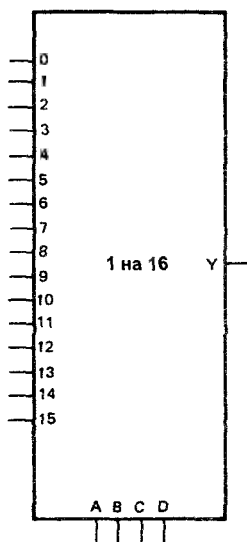


Рис. 35-15. Логическое обозначение шестнадцативходового мультиплексора.

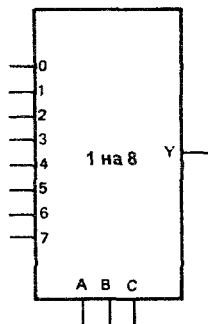


Рис. 35-14. Логическое обозначение восьмивходового мультиплексора.

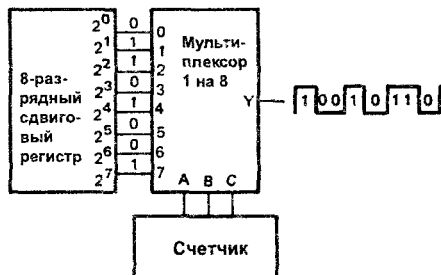


Рис. 35-16. Использование мультиплексора для преобразования данных, представленных параллельным кодом, в последовательный.



последовательное представление параллельного двоичного слова, поданного на вход.

На рис. 35-16 изображена схема преобразования данных из параллельного кода в последовательный с помощью мультиплексора. Трехразрядное двоичное слово со счетчика используется для выбора нужного входа. Параллельное восьмиразрядное слово подается на вход мультиплексора. При увеличении двоичного числа на выходе счетчика последовательно выбираются входы мультиплексора. На выходе мультиплексора появляется последовательное двоичное слово, равное параллельному, поданному на вход.

35-3. Вопросы

1. Что такое мультиплексор?
2. Как используются мультиплексоры?
3. Нарисуйте логическую схему мультиплексора?
4. С данными каких типов имеют дело мультиплексоры?
5. Как использовать мультиплексор для преобразования данных из параллельного кода в последовательный?

35-4. АРИФМЕТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Сумматор

Сумматор — это главный вычислительный элемент цифрового компьютера. Компьютер выполняет всего несколько подпрограмм, в которых не используется сумматор. Сумматоры рассчитаны на работу либо в параллельных, либо в последовательных цепях. Поскольку параллельный сумматор работает быстрее и используется чаще, он будет рассмотрен более детально.

Для того чтобы понять, как работает сумматор, необходимо вспомнить правила сложения:

$$\begin{array}{ccccccc}
 0 & 0 & 1 & & 1 \\
 +0 & +1 & +0 & & +1 \\
 \hline
 \bar{0} & \bar{1} & \bar{1} & \text{Перенос } 1 & \bar{0}
 \end{array}$$



На рис. 35-17 изображена таблица истинности, основанная на этих правилах. Заметим, что греческая буква сигма (Σ) используется для обозначения суммы столбца. Столбец переноса обозначен C_0 . Эти обозначения используются в промышленности при описании сумматора.

Входы		Выходы	
A	B	Σ	C_0
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	0
1	1	0	1

Рис. 35-17. Таблица истинности, составленная с помощью правил сложения.

Столбец суммы в таблице истинности совпадает со столбцом выхода в таблице истинности для элемента исключающее ИЛИ (рис. 35-18). Столбец переноса совпадает со столбцом выхода в таблице истинности для элемента И (рис. 35-19).

На рис. 35-20 изображены элементы И и исключающее ИЛИ, соединенные параллельно для того, чтобы обеспечить логическую функцию, необходимую для одноразрядного сложения. Выход переноса (C_0) обеспечивается элементом И, а выход суммы (Σ) обеспечивается элементом исключающее ИЛИ. Входы A и B соединены со входами элемента И и элемента исключающее ИЛИ. Таблица истинности для этой цепи такая же, как и таблица истинности, полученная с использованием правил двоичного сложения (рис. 35-17). Поскольку эта цепь не учитывает какие-либо переносы, она



A	B	Y
0	0	0
1	0	1
0	1	1
1	1	0

Рис. 35-18. Таблица истинности для элемента исключающее ИЛИ.



A	B	Y
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 35-19. Таблица истинности для элемента И.

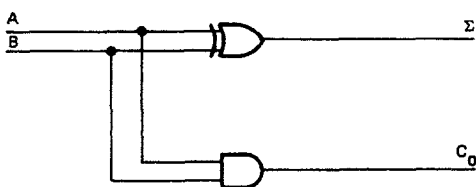


Рис. 35-20. Схема полусумматора.

называется **полусумматором**. Он может быть использован в качестве сумматора младшего разряда при сложении двоичных чисел.

Сумматор, учитывающий перенос, называется **полным сумматором**. Полный сумматор имеет три входа и выходы для суммы и переноса. На рис. 35-21 приведена таблица истинности для полного сумматора. Вход C_1 — это вход переноса. Выход C_0 — это выход переноса.

Входы			Выходы	
A	B	C_1	Σ	C_0
0	0	0	0	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	0	1
0	0	1	1	0
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	1	1

Рис. 35-21. Таблица истинности для полного сумматора.

На рис. 35-22 изображен полный сумматор, составленный из двух полусумматоров. Выходы обоих полусумматоров поданы на входы элемента ИЛИ для получения выхода переноса. На выходе переноса будет 1, если на обоих входах либо первого, либо второго элемента исключающее ИЛИ также будут высокие уровни. На рис. 35-23 показаны обозначения полусумматора и полного сумматора.

Отдельный полный сумматор способен сложить два одноразрядных числа и вход переноса. Для сложения двоичных чисел, имеющих более одного разряда, необходимо использовать дополнительные сумматоры. Вспомним, что

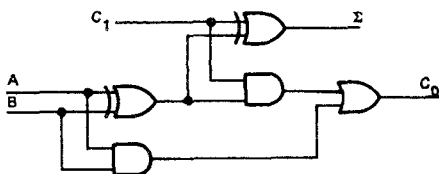


Рис. 35-22. Логическая схема полного сумматора, использующая два полусумматора.

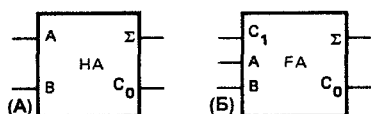


Рис. 35-23. Логические обозначения полусумматора (А) и полного сумматора (В).

когда одно двоичное число складывается с другим, каждый складываемый столбец дает сумму и перенос 0 или 1 в столбец следующего разряда. Для сложения двух двоичных чисел требуется полный сумматор для каждого столбца. Например, для сложения двухразрядного числа с другим двухразрядным числом необходимы два сумматора. Трехразрядные числа требуют трех сумматоров, четырехразрядные — четырех и т.д. Перенос, создаваемый каждым сумматором, подается на вход сумматора следующего высшего разряда. Поскольку для младшего разряда перенос не требуется, для него используется полусумматор.

На рис. 35-24 изображен 4-разрядный параллельный сумматор. Входные биты младшего разряда обозначены A_0 и B_0 . Биты следующего разряда обозначены A_1 и B_1 и т. д. Биты выходной суммы обозначены Σ_0 , Σ_1 , Σ_2 и т.д. Заметим, что выход переноса каждого сумматора соединен со входом переноса сумматора следующего разряда. Выход переноса последнего сумматора является старшим разрядом результата.

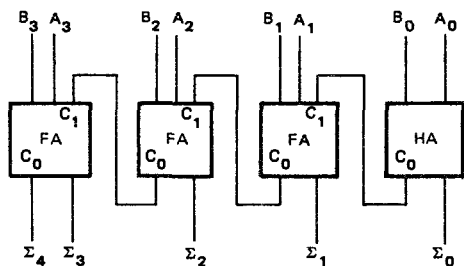


Рис. 35-24. Четырехразрядный параллельный сумматор.

Вычитающее устройство

Вычитающее устройство позволяет вычитать два двоичных числа. Для того чтобы, понять, как работает вычитающее устройство, необходимо вспомнить правила вычитания.



0	Заем	1	0	1	1
- 0			- 1	- 0	- 1
$\bar{0}$			$\bar{1}$	$\bar{1}$	$\bar{0}$

На рис. 35-25 приведена таблица истинности, основанная на этих правилах. Буква D обозначает столбец разности. Столбец заема обозначен буквой B_0 .

Заметим, что на выходе разности (D) высокий уровень появляется только тогда, когда входные переменные не равны. Следовательно, разность может быть выражена как исключающее ИЛИ входных переменных. Заем выхода появляется только тогда, когда на A подан 0, а на B подана 1. Следовательно, выход заема является дополнительным к элементу A ИЛИ B.

Входы		Выходы	
A	B	D	B_0
0	0	0	0
1	0	1	0
0	1	1	1
1	1	0	0

Рис. 35-25. Таблица истинности, составленная с помощью правил вычитания.

На рис. 35-26 изображена логическая схема **полувычитателя**. Она имеет два входа и выдает разность и выход заема. Разность создается элементом исключающее ИЛИ, а выход заема создается элементом И со входами $\bar{A}$ и B. Вход $\bar{A}$ получен путем включения инвертора перед входом A элемента И.

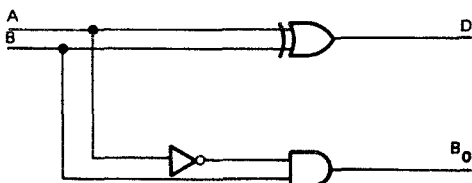


Рис. 35-26. Логическая схема полувычитателя.

Однако полувычитатель не имеет входа заема. Вход заема имеет **полный вычитатель**. Он имеет три входа и создает разность и выход заема. Логическая схема и таблица истинности полного вычитателя изображены на рис. 35-27. На рис. 35-28 изображены обозначения полувычитателя и полного вычитателя.

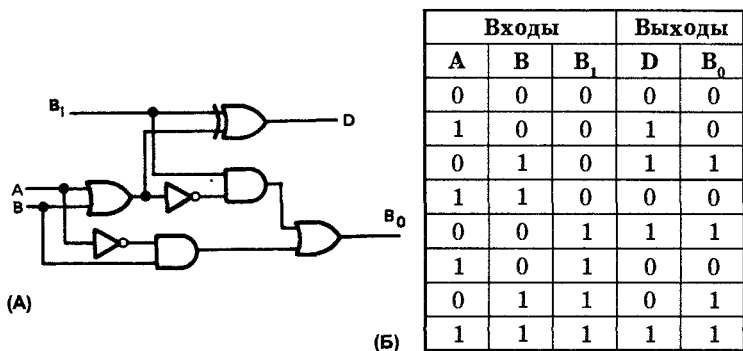
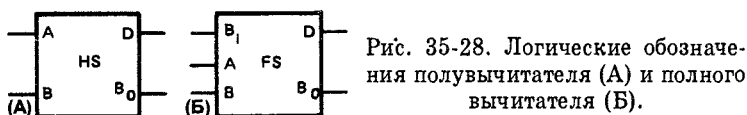


Рис. 35-27. Логическая схема (А) и таблица истинности (Б) для полного вычитателя.



Полный вычитатель может работать только с двумя од-норазрядными числами. Для того чтобы вычитать двоич-ные числа, имеющие большее число разрядов, должны ис-пользоваться дополнительные полные вычитатели. Вспом-ним, что если из 0 вычитать 1, то надо сделать заем из столбца высшего соседнего разряда. Выход заема вычита-теля низшего разряда становится входом заема вычитате-ля высшего соседнего разряда.

На рис. 35-29 изображена блок-схема 4-разрядного вы-читателя. В младшем разряде используется полувычита-тель, поскольку там не нужен вход заема.

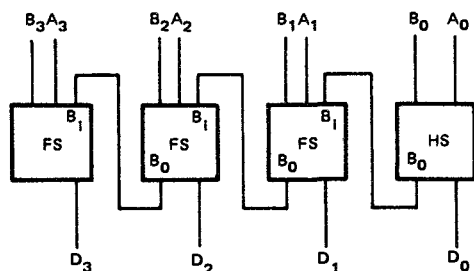


Рис. 35-29. Четырех-разрядный вычита-тель.



Компаратор

Компаратор используется для сравнения величин двух двоичных чисел. Схема определяет, равны два числа или нет. Компаратор не только сравнивает два двоичных числа, но также определяет какое из них больше, а какое меньше.

На рис. 35-30 приведена таблица истинности для компаратора. Когда оба сравниваемых бита одинаковы на выходе компаратора появляется высокий уровень. Столбец выхода представляет собой выход элемента исключающее ИЛИ с инверсией, также известное, как исключающее ИЛИ-НЕ. Элемент исключающее ИЛИ-НЕ по существу

Вход		Выход
A	B	Y
0	0	1
1	0	0
0	1	0
1	1	1

Рис. 35-30. Таблица истинности для компаратора.

является компаратором, так как на его выходе появляется 1 только тогда, когда на оба входа поданы 1. Для сравнения чисел, имеющих 2 разряда и более необходимы дополнительные элементы исключающее ИЛИ-НЕ. На рис. 35-31 изображена логическая схема компаратора для сравнения двух 2-разрядных чисел. Если числа равны, на выходе элемента исключающее ИЛИ-НЕ появляется 1. Эта 1 подается на элемент И, как указательный уровень. Если оба элемента исключающее ИЛИ-НЕ выдают 1 на входы элемента И, то, следовательно, числа равны, и на выходе элемента И также появляется 1. Если же на входах элемента исключающее ИЛИ-НЕ различные уровни, то элемент исключающее ИЛИ-НЕ выдает на выходе 0, и на входе элемента И также будет 0. На рис. 35-32 изображена логическая схема компаратора для сравнения двух

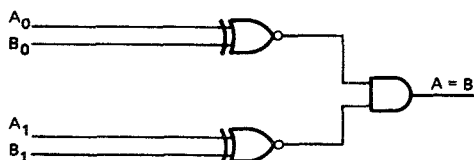


Рис. 35-31. Сравнение двух 2-разрядных чисел.

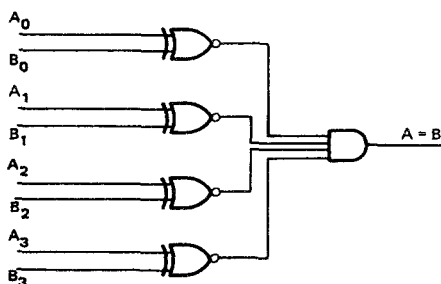


Рис. 35-32. Сравнение двух 4-разрядных чисел.

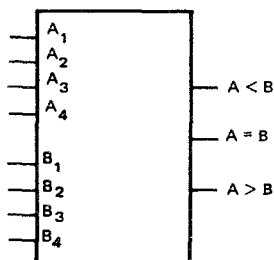


Рис. 35-33. Обозначение 4-разрядного компаратора.

4-разрядных чисел. На рис. 35-33 показано обозначение 4-разрядного компаратора.

35-4. Вопросы

1. Каковы правила сложения двоичных чисел?
2. В чем разница между полусумматором и полным сумматором?
3. Где используется полусумматор?
4. Каковы правила вычитания двоичных чисел?
5. Нарисуйте блок-схему 4-разрядного вычитателя.
6. В чем состоит функция компаратора?
7. Нарисуйте логическую схему компаратора.

РЕЗЮМЕ

- Шифратор имеет один или более входов и создает на выходе многоразрядный двоичный код.
- Десятично-двоичный шифратор преобразует отдельную цифру (от 0 до 9) в четырехразрядный двоичный код, представляющий эту цифру.
- Шифратор с приоритетом выдает код клавиши, соответствующей большей цифре, при одновременном нажатии двух клавиш.
- Десятично-двоичные шифраторы используются для кодировки сигналов от клавиатуры.



- Дешифратор преобразует сложный двоичный код в легко распознаваемые цифры или символы.
- Дешифратор двоично-десятичного кода — это дешифратор специального назначения, предназначенный для управления семисегментными индикаторами.
- Мультиплексор позволяет направлять цифровые данные от отдельных источников в общую линию для передачи по назначению.
- Мультиплексоры могут работать как с аналоговыми, так и с цифровыми данными.
- Мультиплексоры могут использоваться для преобразования данных, представленных параллельным кодом, в последовательный код.
- Таблица истинности для правил сложения двоичных чисел эквивалентна таблице истинности для элемента И и для элемента исключающее ИЛИ.
- Полусумматор не учитывает перенос в старший разряд.
- Полный сумматор учитывает перенос в старший разряд.
- Для сложения двух 4-разрядных чисел требуются три полных сумматора и один полусумматор.
- Таблица истинности для правил вычитания двоичных чисел эквивалентна таблице истинности для элемента И с инвертором на одном из входов и для элемента исключающее ИЛИ.
- Полувычитатель не имеет входа заема.
- Полный вычитатель имеет вход заема.
- Компаратор используется для сравнения величин двух двоичных чисел.
- На выходе компаратора появляется высокий уровень только тогда, когда два сравниваемых разряда одинаковы.
- Компаратор может также определить, какое из сравниваемых чисел больше, а какое меньше.

Глава 35. САМОПРОВЕРКА

1. Почему в логических цепях необходимы шифраторы?



2. Какой шифратор требуется для ввода данных с клавиатуры?
3. Почему в логических цепях необходимы дешифраторы?
4. Как применяются дешифраторы различных типов?
5. Кратко опишите работу цифрового мультиплексора.
6. Где могут использоваться цифровые мультиплексоры?
7. С помощью логических обозначений нарисуйте схему, содержащую полусумматор и сумматор, соединенные вместе для сложения 2-разрядных чисел.
8. Объясните, как работает сумматор, описанный в вопросе 7.

Глава 36.

ОСНОВЫ МИКРОКОМПЬЮТЕРОВ

ЦЕЛИ

После изучения этой главы студент должен быть в состоянии:

- Перечислить основные блоки компьютера.
- Объяснить назначение каждого блока компьютера.
- Описать программу и объяснить, как она связана с компьютерами и микропроцессорами.
- Перечислить основные регистры микропроцессора.
- Объяснить, как работает микропроцессор.
- Перечислить группы команд, связанных с микропроцессорами.

Наибольшее применение цифровые цепи и сигналы находят в компьютерах. *Компьютер* — это устройство, автоматически обрабатывающее данные в цифровом виде с помощью цифровой техники. Обработка данных означает проведение различных операций с ними.

Компьютеры классифицируются по размерам и вычислительной мощности. Самые мощные компьютеры называются *мэйнфреймами*¹. Они дороги, но имеют большую память и высокую скорость вычислений. Самые маленькие компьютеры — миникомпьютеры и микрокомпьютеры — более доступны и широко используются. *Микрокомпьютер* — это наименьший и наименее дорогой из компьютеров, еще сохраняющий все свойства и характеристики компьютера.

Компьютеры классифицируются по назначению. Основное их назначение — обработка данных. В промышленности, бизнесе и других областях компьютеры используют

¹ Это слово сейчас широко используется в отечественной компьютерной литературе (Прим переводчика)



для хранения данных, бухгалтерского учета, складского учета и для других самых различных функций.

Компьютеры могут быть общего и специального назначения. Компьютеры общего назначения очень гибкие и могут быть запрограммированы для решения любых задач. Компьютеры специального назначения рассчитаны на выполнение определенной задачи.

36-1. ОСНОВЫ УСТРОЙСТВА КОМПЬЮТЕРА

Все **цифровые компьютеры** состоят из пяти основных блоков: **блока управления**, **арифметико-логического устройства (АЛУ)**, **памяти**, **ввода** и **вывода** (рис. 36-1). В некоторых случаях блоки ввода и вывода объединены в один блок, называемый блоком ввода-вывода. Так как блок управления и арифметико-логический блок тесно связаны между собой и их трудно отделить друг от друга, их вместе можно назвать **центральным процессором (CPU)** или **микропроцессорным блоком**.

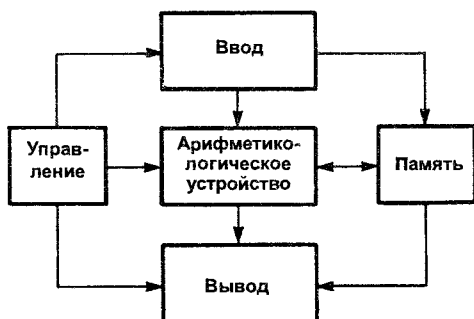


Рис. 36-1. Основные блоки компьютера.

Блок управления дешифрует каждую команду, поступающую в компьютер. После этого он выдает импульсы, необходимые для выполнения указанных функций. Если, например, команда требует сложить два числа, блок управления посылает импульсы в арифметико-логическое устройство (АЛУ) для выполнения сложения. Если команда требует запомнить слово в памяти, блок управления посылает необходимые импульсы в память для того, чтобы сохранить данные.



Современные компьютеры обладают способностью объединять несколько команд в одну. Это осуществляется с помощью программы, хранящейся в памяти. Когда команда дешифрована блоком управления, эта программа выдает последовательность инструкций для ее выполнения.

Блоки управления различных компьютеров отличаются друг от друга. В основном, блок управления состоит из индексного регистра, регистра команд, дешифратора команд, счетчика команд, генератора тактовых импульсов и схемы формирования импульсов управления (рис. 36-2).

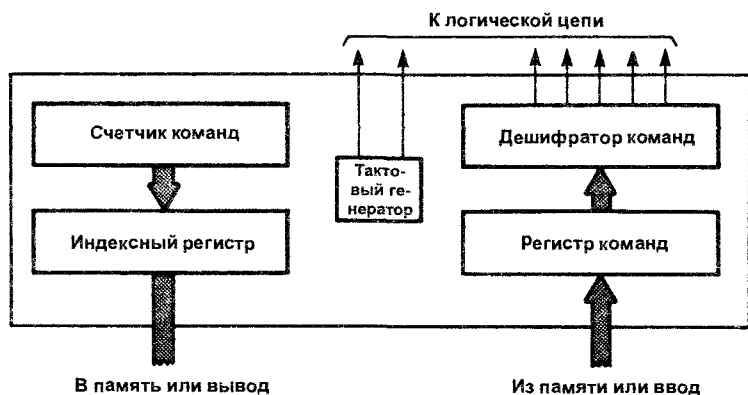


Рис. 36-2. Блок управления компьютера.

Регистр команд запоминает командное слово, которое должно быть дешифровано. Это слово дешифруется дешифратором команд, посылающим соответствующий логический сигнал в генератор импульсов управления. Генератор импульсов управления выдает импульс при поступлении соответствующего тактового импульса. Выходной импульс генератора импульсов управления позволяет другой цепи в компьютере выполнить заданную команду.

Счетчик команд отслеживает последовательность команд, которые должны быть выполнены. Команды хранятся в программе, хранящейся в памяти. Для того чтобы программа начала выполняться, в счетчик команд помещается начальный адрес программы (определенное место в памяти).



Первая команда вызывается из памяти, дешифруется и выполняется. После этого счетчик команд автоматически перемещается к адресу следующей команды. Каждый раз, когда команда вызывается и выполняется, счетчик команд продвигается на один шаг до тех пор, пока программа не будет завершена.

Некоторые команды задают переход в другое место программы. Регистр команд содержит адрес расположения следующей команды, и он загружается в индексный регистр.

АЛУ выполняет операции, связанные с математической логикой и принятием решений. Большинство арифметико-логических устройств могут делать сложение и вычитание. Умножение и деление программируются в блоке управления. Арифметико-логическое устройство может выполнять логические операции, такие как инверсия, И, ИЛИ и исключающее ИЛИ. Оно может также принимать решения путем сравнения заданных чисел с 0, 1 или отрицательными числами.

На рис. 36-3 изображена блок-схема арифметико-логического устройства. Оно состоит из арифметико-логической цепи и накапливающего регистра. Все данные в арифметико-логическую цепь и накапливающий регистр посылаются через регистр данных. Содержимое накапливающего регистра может быть увеличено на 1, уменьшено на 1, сдвинуто вправо на одну позицию или влево на одну позицию. Накапливающий регистр имеет такой же размер, как

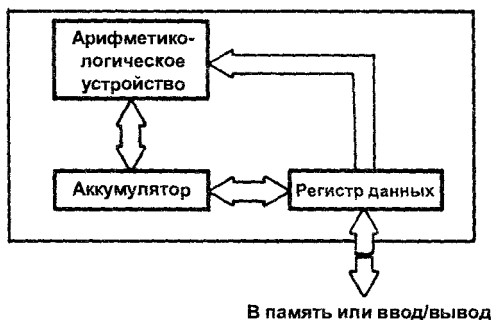


Рис. 36-3. Арифметико-логическое устройство (АЛУ).



и слово памяти; в 8-разрядном микропроцессоре слово памяти и накапливающий регистр имеют размер 8 бит.

Арифметико-логическая цепь является, главным образом, двоичным сумматором. Двоичный сумматор может производить сложение, вычитание и логические операции. Для сложения двух двоичных чисел, одно число запоминается в накапливающем регистре, а другое запоминается в регистре данных. После сложения сумма двух чисел размещается в накапливающем регистре, заменяя исходное двоичное число.

Память — это место, где хранятся программы. *Программы* содержат команды, указывающие компьютеру, что надо делать. Программа — это последовательный набор команд для решения определенной задачи.

Память компьютера — это просто некоторое количество регистров хранения. Данные могут быть загружены в регистры и могут быть выгружены оттуда или «считаны» для выполнения каких-либо операций, сохраняющих содержимое регистров. Каждому регистру или ячейке памяти сопоставлено число, называемое адресом. Адрес используется для определения места данных в памяти.

На рис. 36-4 изображено типичное распределение памяти. Регистры памяти сохраняют двоичные данные. Эта память, обычно называемая *памятью с произвольным доступом (RAM)*, основана на способности ячеек памяти хранить (записывать) или находить (читать) данные, или *памятью только для чтения (ROM)*, способной только считывать данные из памяти.

Регистр адреса ячейки памяти обеспечивает доступ к определенным ячейкам памяти с помощью дешифратора адреса ячейки памяти. Размер регистра адреса ячейки памяти определяется максимальной емкостью памяти компьютера. Например, 16-разрядный регистр адреса ячейки памяти позволяет адресовать 2^{16} или 65 536 ячеек памяти.

Слово, которое необходимо сохранить в памяти, помещается сначала в регистр данных, а после этого в нужную

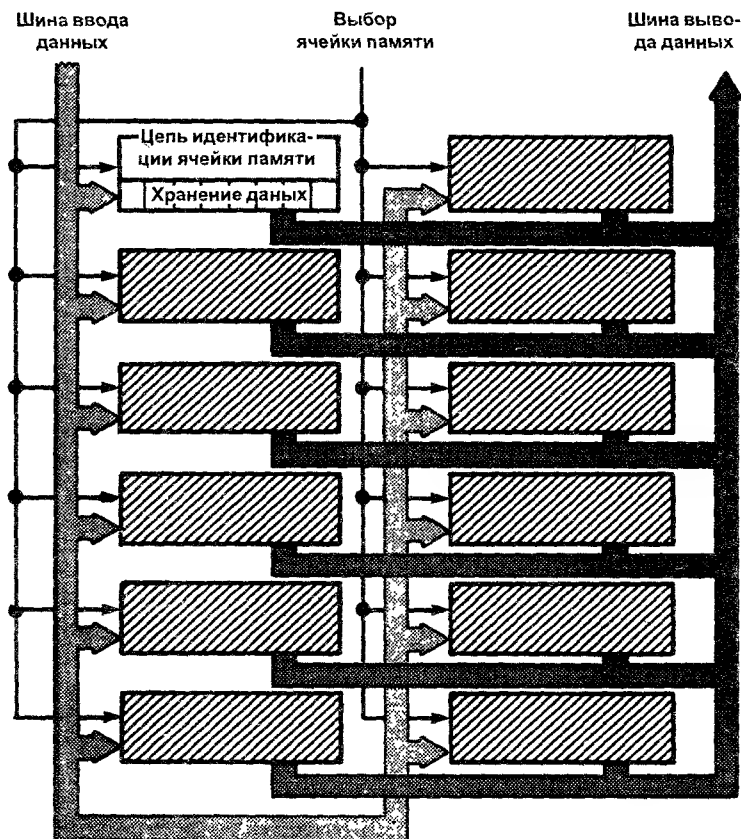


Рис. 36-4 Распределение памяти в компьютере.

ячейку памяти. Для того, чтобы прочесть данные из памяти, определяется адрес ячейки памяти, и данные из ячейки памяти загружаются в сдвиговый регистр.

Блоки ввода и вывода компьютера позволяют принимать и передавать информацию, то есть обмениваться информацией с окружающим компьютер миром. Оператор или периферийное оборудование вводят данные в компьютер через блок ввода. Данные из компьютера поступают на внешнее периферийное оборудование через блок вывода.



Блоки ввода и вывода управляются центральным процессором. Для передачи данных в компьютер и из компьютера используются специальные команды ввода/вывода (I/O).

Большинство компьютеров могут выполнять команды ввода/вывода по запросу прерываний. Прерывание — это сигнал от внешнего устройства, запрашивающий вид обслуживания: передача или прием данных. Прерывание приводит к прекращению работы компьютера над текущей программой, и переходу к работе над другой программой. Когда работа по запросу прерывания завершается, компьютер возвращается к работе над прерванной программой.

36-1. Вопросы

1. Нарисуйте блок-схему компьютера.
2. Каковы функции следующих блоков компьютера?
 - а. Блока управления.
 - б. Арифметико-логического устройства.
 - в. Памяти.
 - г. Ввода.
 - д. Вывода.
3. Какова функция ROM (памяти только для чтения) компьютера?
4. Что показывает последовательность команд, которые должны быть выполнены?
5. Чем определяется количество данных, которое может храниться в компьютере?
6. Дайте определение *программы*.

36-2. АРХИТЕКТУРА МИКРОПРОЦЕССОРА

Микропроцессор содержит четыре основные части: регистры, арифметико-логическое устройство, цепи синхронизации и управления и цепи дешифрации. Микропроцессор сконструирован таким образом, что команда или программа может быть извлечена из памяти, помещена в регистр



команд и дешифрована. Программа влияет на цепи синхронизации, управления и дешифрации. Программа позволяет оператору направлять данные в различные регистры и арифметико-логическое устройство и извлекать их оттуда. Регистры и арифметико-логическое устройство используются микропроцессором для обработки данных и информации.

Различные микропроцессоры отличаются друг от друга архитектурой и набором команд. На рис. 36-5 изображены основные части многих 8-разрядных микропроцессоров. Поскольку названия и количество регистров в различных микропроцессорах различны, они изображены и перечислены отдельно.

Аккумулятор — это регистр наиболее часто используемый в микропроцессоре. Он используется для приема или хранения данных из памяти или устройства ввода/вывода. Его работа также связана с работой арифметико-логического устройства. Количество разрядов в аккумуляторе определяет размер слова в микропроцессоре. В 8-разрядном микропроцессоре размер слова — 8 разрядов.

Регистр условия кода — это 8-разрядный регистр, позволяющий программисту проверить состояние микропроцессора в некоторой точке программы. В зависимости от микропроцессора этот регистр может называться регистром состояния процессора, регистром состояния или флаговым регистром (регистром признака). Один разряд в этом регистре называется флаговым разрядом. Чаще всех встречаются флаг переполнения, нулевой флаг и флаг знака. Флаг переполнения используется во время арифметических дей-

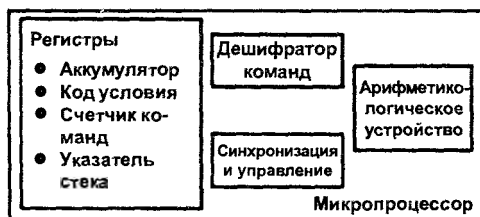


Рис. 36-5. Узлы 8-разрядного микропроцессора.



ствий для определения необходимости переноса или заема. Нулевой флаг используется для определения наличия нулей во всех разрядах результата или команды. Флаг знака используется для указания знака числа — положительный или отрицательный. Из 8 разрядов этого регистра процессоры Motorola 6800 и Zilog Z80 используют 6 разрядов; процессор Intel 8080A использует 5; процессор MOS Technology 6502 использует 7.

Счетчик команд — это 16-разрядный регистр, содержащий адрес команды, извлеченный из памяти. По мере того как команды выполняются, содержимое счетчика увеличивается на единицу для извлечения адреса следующей команды. Содержимое счетчика команд может только увеличиваться. Однако, последовательность команд может быть изменена с помощью команд ветвления или перехода.

Указатель стека — это 16-разрядный регистр, содержащий адрес ячейки памяти данных, хранящихся в стеке. Стек будет обсуждаться немного позднее.

Большинство микропроцессоров имеют одинаковые наборы основных команд с различными машинными кодами и несколько собственных команд. Основные команды делятся на девять категорий:

1. Перемещение данных.
2. Арифметические.
3. Логические.
4. Сравнение и проверка.
5. Вращение и сдвиг.
6. Управление программой.
7. Стек.
8. Ввод/вывод.
9. Разные.

Команды перемещения данных перемещают данные из одного места в другое внутри микропроцессора и памяти (рис. 36-6). Данные перемещаются сразу по 8 бит в параллельном коде (одновременно) из одного места в другое.



Команды микропроцессора используют символические обозначения, указывающие, как перемещать данные. В микропроцессорах 6800 и 6502 стрелка перемещает слева направо. В микропроцессорах 8080А и Z80 стрелка перемещает справа налево. В любом случае сообщение об операции одинаково. Данные перемещаются от источника к месту назначения.

Описание команды	Мнемоническое обозначение	Обозначение	Источник	Место назначения
Загрузить аккумулятор	LDA	$M \rightarrow A$	Память	Аккумулятор
Загрузить регистр X	LDX	$M \rightarrow X$	Память	Регистр X
Запомнить содержимое аккумулятора	STA	$A \rightarrow M$	Аккумулятор	Память
Запомнить содержимое регистра X	STX	$X \rightarrow M$	Регистр X	Память
Перенести содержимое аккумулятора в регистр X	TAX	$A \rightarrow X$	Аккумулятор	Регистр X
Перенести содержимое регистра X в аккумулятор	TXA	$X \rightarrow A$	Регистр X	Аккумулятор

Рис. 36-6. Команды перемещения данных.

Арифметические команды влияют на арифметико-логическое устройство. Наиболее мощными командами являются сложение, вычитание, приращение и уменьшение. Эти команды позволяют микропроцессору проводить вычисления и обрабатывать данные. Они отличают компьютер от произвольной логической цепи. Результат работы этих команд помещается в аккумулятор.

Логические команды — это команды, содержащие один или более Булевых операторов: И, ИЛИ и исключаящее ИЛИ. Они работают одновременно с восемью битами в



АЛУ, а результаты работы этих команд помещаются в аккумулятор. Другой логической операцией является команда дополнения. Она включает дополнение до единицы и дополнение до двух. Так как дополнение осуществляется с помощью дополнительной цепи, эта операция содержится не во всех микропроцессорах. Микропроцессоры 6502 не содержат команды дополнения. Микропроцессор 8080А имеет команду дополнения до единицы. Микропроцессоры 6800 и Z80 имеют команды дополнения до единицы и дополнения до двух.

Операции дополнения обеспечивают метод представления чисел со знаками. Дополняющие числа позволяют АЛУ выполнять операции вычитания с помощью цепи сумматора. Следовательно, блок микропроцессора может использовать одни и те же цепи для сложения и вычитания.

Команды сравнения сравнивают данные в аккумуляторе с данными в ячейке памяти или в другом регистре. Результат сравнения не хранится в аккумуляторе, но в результате сравнения может измениться флаговый бит. Сравнение может быть выполнено путем наложения (маскирования) или путем поразрядной проверки. Маскирование — это процесс вычитания двух чисел, позволяющий вычитать только определенные разряды. Маска — это заранее определенный набор разрядов, используемых для определения существования некоторых условий внутри микропроцессора. Недостаток процедуры маскирования в том, что она использует команду И и, следовательно, разрушает содержимое аккумулятора. Хотя процедура побитовой проверки также использует команду И, она не разрушает содержимое аккумулятора. Команду побитовой проверки имеют не все микропроцессоры.

Команды вращения и сдвига изменяют данные в регистре или в памяти путем перемещения данных вправо или влево на один разряд. Обе команды используют разряд переноса. Разница между этими командами состоит в том, что команда вращения сохраняет данные, а команда сдвига разрушает их.



Команды управления программой изменяют содержимое счетчика команд. Эти команды позволяют микропроцессору выбирать определенные ячейки памяти для выполнения различных программ или для повторения части той же программы. Команды могут быть безусловными, изменяющими содержимое счетчика команд, или условными, которые сначала проверяют состояние флагового бита для того, чтобы узнать, можно ли изменить содержимое счетчика команд. Если условие флагового бита не удовлетворяется, то выполняется следующая команда.

Команды стека позволяют хранить и извлекать содержимое различных регистров микропроцессора в стек. **Стек** — это временная ячейка памяти, используемая для хранения содержимого счетчика команд в течение перехода к подпрограмме. Разница между стеком и другими формами памяти в способе, с помощью которого осуществляется доступ к данным или их адресация. Команда «push» запоминает содержимое регистра, а команда «pull» находит содержимое регистра. Преимущество стека в том, что данные в нем можно сохранить или прочитать с помощью одноразрядных команд. Все данные передаются из верхней части стека в аккумулятор. Это означает, что аккумулятор сообщается только с верхней ячейкой стека.

В микропроцессорах 6800 и 6502 содержимое регистра запоминается в стеке, и после этого указатель стека уменьшается на 1. Это позволяет указателю стека отметить следующую ячейку памяти, где могут быть сохранены данные. **Указатель стека** — это 16-разрядный регистр, используемый для определения ячейки памяти, действующей, как вершина стека. Когда используется команда «pull», указатель стека увеличивается на 1, данные извлекаются из стека и помещаются в соответствующий регистр. В процессоре 8080A вершина стека содержит указатель на последнюю ячейку памяти. Команда «push» сначала уменьшает указатель стека на 1, а после этого помещает содержимое регистра в стек.



Команды ввода/вывода предназначены только для управления устройствами ввода/вывода. Процессоры 8080А, 8085 и Z80 имеют команды ввода/вывода. Процессоры 6800 и 6502 специальных команд ввода/вывода не имеют. Если микропроцессор использует команды ввода/вывода для работы с внешними устройствами, то ввод/вывод называется *независимым*.

Некоторые команды не попадают ни в одну из перечисленных категорий. Эти команды объединены вместе и названы разными командами. Среди этих команд находятся те, которые разрешают и запрещают линии прерываний, очищают или устанавливают флаговые биты, или позволяют микропроцессору выполнять арифметические операции в двоично-десятичном коде. Среди них также содержатся команды, останавливающие или временно прерывающие выполнение программ.

36-2. ВОПРОСЫ

1. Каковы основные части микропроцессора?
2. Какие регистры находятся в микропроцессоре?
3. На какие основные категории делятся команды микропроцессора?

РЕЗЮМЕ

- Компьютеры состоят из блока управления, арифметико-логического устройства, памяти и блока ввода/вывода.
- Блок управления дешифрует команды и выдает импульсы, необходимые для работы компьютера.
- Арифметико-логическое устройство выполняет математические и логические операции, а также операции, связанные с принятием решений.
- Память — это место, где хранятся данные и программы, ожидающие работы с ними.
- Блоки ввода/вывода позволяют вводить данные в компьютер и выводить их из компьютера.



- Блок управления и арифметико-логическое устройство могут находиться в одном корпусе, который называется микропроцессором.
- Программа — это набор команд, расположенных в последовательном порядке для решения определенной задачи.
- Микропроцессор содержит регистры, арифметико-логическое устройство, цепи синхронизации и управления и цепи дешифрации.
- Команды микропроцессора делятся на девять категорий:
 - Перемещение данных.
 - Арифметические.
 - Логические.
 - Сравнение и проверка.
 - Вращение и сдвиг.
 - Управление программой.
 - Стек.
 - Ввод/вывод.
 - Разные.

Глава 36. САМОПРОВЕРКА

1. Опишите, как работает компьютер.
2. Каким образом компьютер, связанный с внешним миром, осуществляет получение данных от внешних устройств?
3. В чем разница между микрокомпьютером и микропроцессором?
4. Каковы функции микропроцессора?

СЛОВАРЬ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

DIP корпус — стандартный корпус интегральных микросхем.

D-триггер — триггер, который имеет только один вход данных и вход тактовых импульсов.

JK-триггер — триггер, который объединяет все особенности других триггеров.

p-i-n фотодиод — фотодиод со слоем нелегированного полупроводника между слоями p и n типа.

RS-триггер — триггер с входом установки и сброса.

Автотрансформатор — трансформатор, у которого вторичная обмотка является частью первичной.

Аккумулятор — наиболее часто используемый регистр микропроцессора.

Активные фильтры — безындуктивные фильтры, использующие интегральные микросхемы.

Ампер — единица измерения величины тока.

Амперметр — прибор для измерения величины тока в цепи.

Ампер-час — величина, используемая для измерения заряда батареи.

Амплитуда — максимальное значение синусоидального сигнала или максимальное значение гармоник сложного сигнала.

Аналоговый измерительный прибор — прибор, использующий градуированную шкалу со стрелкой.

Арифметико-логическое устройство (АЛУ) — выполняет в компьютере операции, связанные с математической логикой и принятием решений.

Арифметические команды — позволяют микропроцессору проводить вычисления и обрабатывать данные.

Асинхронный — неодновременный.

Астабильный мультивибратор — ждущий мультивибратор.



Атом — наименьшая основная единица вещества.

Атомный вес — масса атома (число протонов и нейтронов).

Атомный номер — число протонов в ядре атома.

Батарея — соединение двух или более элементов питания.

Биполярный транзистор — полупроводниковое устройство, способное усиливать напряжение или мощность.

Бистабильное действие — относится к работе устройств с двумя устойчивыми состояниями.

Бистабильный мультивибратор — мультивибратор с двумя устойчивыми состояниями.

Бит — двоичный разряд (аббревиатура слов binary digit).

Блок управления — дешифрует команды по мере их поступления в компьютер.

Блок-схема — упрощенная схема электронного устройства, на которой отдельные части устройства изображены в виде прямоугольников-блоков.

Валентная оболочка — внешняя электронная оболочка атома.

Валентность — способность атома присоединять или терять электроны.

Ватт — единица измерения мощности.

Ввод/вывод — позволяет компьютеру принимать и передавать данные.

Вектор — графическое представление в виде стрелки величины, имеющей численное значение и направление.

Взаимная индуктивность — эффект в трансформаторе, приводящий к увеличению тока в первичной обмотке.

Видеоусилитель — широкополосные усилители, используемые для усиления видеосигналов частотой до 6 МГц.

Вольт — единица измерения напряжения.

Вольт-ампер (ВА) — единица измерения полной мощности в трансформаторах, электродвигателях и т.п.

Вольтметр — устройство, используемое для измерения напряжения между двумя точками цепи.



Временные магниты — магниты, которые сохраняют только часть своих магнитных свойств.

Время нарастания — время, за которое амплитуда импульса увеличивается от 10% максимального значения до 90% максимального значения.

Время спада — время, за которое амплитуда импульса уменьшается от 90% максимального значения до 10% максимального значения.

Вторичный элемент — перезаряжаемый химический элемент.

Выброс — имеет место тогда, когда передний край импульса превышает его максимальное значение.

Вывод — соединительный провод, такой, например, как от измерительного прибора, батареи и т.д.

Выпрямитель — преобразует переменное напряжение в постоянное.

Выпрямление — процесс преобразования переменного тока в постоянный.

Вычитатель — логическая цепь, производящая вычитание двух двоичных чисел.

Гармоники — частоты, кратные частоте основного колебания.

Генератор — устройство, используемое для получения электричества с помощью магнитного поля.

Генератор — цепь, которая генерирует повторяющийся сигнал переменного тока.

Генератор Ван-де-Граафа — устройство, используемое для получения электричества путем трения.

Генератор синусоидальных колебаний — генератор, вырабатывающий синусоидальные колебания.

Генераторы несинусоидальных колебаний — генераторы, которые генерируют несинусоидальные колебания.

Генри — единица измерения индуктивности.

Германий — элемент серо-белого цвета, добываемый из золы и некоторых типов угля.

Герц — единица измерения частоты, количество колебаний в секунду.



Громкоговоритель — устройство, преобразующее ток звуковой частоты в звуковые волны.

Двоичная система счисления — система счисления с основанием 2, использующая две цифры — 0 и 1.

Двоично-десятичный код — код из четырех двоичных цифр, представляющий десятичные числа от 0 до 9.

Двухполупериодный выпрямитель — работает в течение обоих полупериодов с каждой половиной вторичной обмотки по очереди.

Десятично-двоичный шифратор — преобразует десятичную цифру в 4-разрядный двоичный код.

Десятично-двоичный шифратор с приоритетом — выдает двоичный код, соответствующий наибольшей десятичной цифре при подаче на вход нескольких цифр.

Десятичный счетчик — счетчик с основанием десять.

Дешифратор — преобразует двоичные коды в распознаваемые символы.

Диаграмма Вейча — таблица, используемая для упрощения сложных Булевых выражений.

Диак — двунаправленный переключающий диодный тиристор.

Диод — полупроводниковое устройство, которое позволяет току течь только в одном направлении.

Дифференциальный усилитель — усилитель с двумя отдельными входами и одним или двумя выходами.

Дифференцирующая цепь — используется для получения узких импульсов из прямоугольных.

Длительность импульса — промежуток времени, в течение которого напряжение падает от своего максимального значения до минимального.

Допуск — допустимые пределы, в которых может изменяться номинальное значение резистора.

Дырка — отсутствие электрона.

Емкостное сопротивление — противодействие конденсатора приложенному переменному напряжению.

Емкость — способность устройства сохранять энергию в электростатическом поле.



Ждущий мультивибратор — см. *Моностабильный мультивибратор*.

Задний фронт — задняя часть импульса.

Закон Ома — соотношение между током, напряжением и сопротивлением.

Закон Фарадея — основной закон электромагнетизма. Напряжение, индуцируемое в проводнике, прямо пропорционально скорости, с которой проводник пересекает силовые линии магнитного поля.

Закороченная цепь — цепь, имеющая короткое замыкание; имеет нулевое сопротивление.

Замкнутая цепь — цепь, обеспечивающая замкнутый путь для протекания тока.

Защита от превышения напряжения — защищает нагрузку от превышения напряжением заданного уровня.

Звон — затухающие колебания, возникающие в резонансной цепи как отклик на ударное возбуждение.

Земля — общая точка в электрических и электронных цепях.

И — логическое умножение.

Изолятор — материал, в котором мало свободных электронов.

Изоляционный трансформатор — используется для предотвращения поражения электрическим током; изолирует рабочую цепь от основной цепи.

ИЛИ — логическое сложение.

Импеданс — противодействие протеканию переменного тока.

Индуктивное сопротивление — противодействие катушки индуктивности протеканию переменного тока.

Индуктивность — свойство катушки противодействовать изменениям тока.

Индукция — влияние одного тела на другое без физического контакта.

Интегральная микросхема — полная электронная схема в небольшом корпусе.

Интегрирующая цепь — цепь, используемая для изменения формы сигнала.



Ионизация — процесс присоединения или потери электронов атомом.

Канал — U-образная область в полевом транзисторе с р-n-переходом.

Катушка индуктивности — устройство, имеющее определенную индуктивность.

Ковалентная связь — процесс совместного использования атомами валентных электронов.

Колебательный контур — образуется путем параллельного соединения катушки индуктивности и конденсатора.

Команды ввода/вывода — управляют устройствами ввода/вывода.

Команды вращения и сдвига — изменяют данные в регистре или в памяти путем перемещения данных вправо или влево на один разряд.

Команды перемещения данных — перемещают данные из одной ячейки в другую внутри микропроцессора и памяти.

Команды разные — команды, используемые для разрешения и запрещения линий прерывания, снятия и установки флаговых битов и разрешения микропроцессору выполнять арифметические операции в двоично-десятичном коде.

Команды сравнения — сравнивают данные в аккумуляторе с данными из ячейки памяти или другого регистра.

Команды стека — позволяют записывать и извлекать содержимое различных регистров микропроцессора в стек.

Команды управления программой — изменяют содержимое счетчика команд.

Компаратор — логическая цепь, используемая для сравнения величин двух двоичных чисел.

Компенсация частоты — внутренняя цепь, не требующая внешних элементов.

Компьютер — устройство, которое автоматически обрабатывает данные, используя цифровую технику.

Конденсатор — устройство, обладающее емкостью.



Концепция временных характеристик — колебания любой формы могут быть преобразованы друг в друга с помощью различных цепей.

Концепция частотных характеристик — все периодические сигналы состоят из синусоид.

Кремниевый управляемый вентиль (КУВ) — тиристор, который управляет током только в одном направлении.

Кремний — элемент, добываемый из окиси кремния, широко распространенной в земной коре.

Кулон — единица измерения электрического заряда (соответствует $6,24 \times 10^{24}$ электронов).

Легирование — процесс добавления примесей в полупроводниковый материал.

Логические команды — команды, которые содержат один или более Булевых операторов (И, ИЛИ и исключающее ИЛИ).

Магнит — кусок железа или стали, притягивающий другие куски железа или стали.

Магнитная индукция — влияние магнита на предмет без физического контакта.

Магнитное поле — силовое поле, создаваемое магнитом в окружающем пространстве.

Максимальное обратное напряжение — максимальное напряжение, которое можно безопасно приложить к диоду в обратном направлении.

Материя — все, что находится в пространстве.

Микроампер — одна миллионная часть ампера.

Микропроцессор — содержит АЛУ, тактовый генератор, блок управления и цепи дешифрации компьютера.

Миллиампер — одна тысячная часть ампера.

Молекула — наименьшая частица соединения, которая сохраняет его химические свойства.

Моностабильный мультивибратор — мультивибратор только с одним стабильным состоянием.

МОП транзистор — полевой транзистор на основе структуры металл-окисел-полупроводник.



Мостовой выпрямитель — двухполупериодный выпрямитель, дающий выходное напряжение со всей вторичной обмотки.

Мощность — скорость, с которой энергия поглощается сопротивлением цепи.

Мультивибратор — релаксационный генератор, который имеет два временно стабильных состояния.

Мультиметр — вольтметр, амперметр и омметр, объединенные в одном приборе.

Мультиплексор — выбирает данные от одного из нескольких входов и направляет их на выход.

Напряжение — другое название разности потенциалов.

Напряжение смещения — внешнее напряжение, приложенное к р-п-переходу.

Независимый (генератор или мультивибратор) — не требующий для своей работы внешнего триггера.

Нейтрон — электрически нейтральная частица в ядре атома.

Обедненный слой — область вблизи р-п-перехода.

Область стабилизации — область немного выше области пробоя, где работает стабилитрон.

Обогащенный режим — режим, при котором в нормальном состоянии МОП транзистор не проводит до тех пор, пока на затвор не будет подано напряжение смещения.

Оболочка — орбиты вокруг ядра.

Обратное смещение — устройство подключено таким образом, что ток не может течь через р-п-переход.

Ограничивающая цепь — цепь, используемая для ограничения пиков приложенного сигнала.

Однополупериодный выпрямитель — работает только половину периода входного напряжения.

Ом — единица сопротивления.

Омметр — прибор для измерения сопротивления.

Операционный усилитель — усилитель постоянного тока с очень высоким сопротивлением.

Оптопара — используется для изоляции нагрузки от источника.



Основание системы счисления — максимальное количество состояний в счетной последовательности.

Осциллограф — обеспечивает визуальное отображение того, что происходит в цепи.

Отвод — вывод от части витков вторичной обмотки трансформатора.

Отношение числа витков — определяется делением числа витков вторичной обмотки на число витков первичной обмотки.

Отрицательная обратная связь — подача выходного сигнала на вход для противодействия температурным изменениям.

Отрицательная обратная связь — способ подачи части выходного сигнала на вход для уменьшения усиления.

Отрицательный ион — атом, который присоединил один или более электронов.

Отрицательный температурный коэффициент — при увеличении температуры сопротивление уменьшается.

Падение напряжения — имеет место при протекании тока в цепи.

Память — хранит программы и данные для работы компьютера.

Параллельная цепь — обеспечивает два или более путей для тока.

Параллельное соединение элементов питания — элементы питания, у которых все положительные выводы и все отрицательные выводы соединены вместе.

Пассивные фильтры — фильтры, которые используют резисторы, катушки индуктивности и конденсаторы.

Первичный элемент — химический элемент, который нельзя подзарядить.

Переменный конденсатор — конденсатор, емкость которого может изменяться либо изменением расстояния между пластинами (подстроечный конденсатор), либо изменением перекрытия двух наборов пластин (конденсатор настройки).

Переменный ток — ток, текущий попеременно, то в одном направлении, то в противоположном.



Переходной процесс — временная компонента тока, существующая в цепи при изменении нагрузки, изменении напряжения или прохождении импульса.

Период — время, необходимое для завершения полного цикла колебания.

Периодические колебания — колебания, которые происходят через регулярные интервалы.

Пиковое значение — абсолютное значение сигнала, соответствующее наибольшей амплитуде.

Плавкий предохранитель — устройство, которое выходит из строя при перегрузке.

Плоская амплитудно-частотная характеристика — показывает, что усиление усилителя только немного изменяется в пределах заданного диапазона частот.

Повышающий трансформатор — трансформатор, у которого напряжение на вторичной обмотке больше, чем на первичной.

Подложка — образует основу полупроводникового устройства.

Полевой транзистор с р-п-переходом — полевой транзистор, который может обеспечивать усиление.

Полевой транзистор с изолированным затвором обедненного типа — устройство, которое проводит при нулевом смещении на затворе.

Полевые транзисторы с изолированным затвором (МОП транзисторы) обогащенного типа — устройства, которое проводит только тогда, когда на затвор подано напряжение смещения.

Полный вычитатель — вычитатель, который учитывает заем.

Полный сумматор — сумматор, который учитывает перенос.

Положительная обратная связь — метод повышения усиления путем подачи части выходного напряжения на вход.

Положительная обратная связь — подача на вход части синфазного выходного сигнала.



Положительный ион — атом, который потерял один или более электронов.

Полувычитатель — вычитатель, который не учитывает заем.

Полупроводник — материал, который имеет четыре валентных электрона.

Полупроводниковый материал n-типа — полупроводниковый материал, легированный пятиявалентным материалом.

Полупроводниковый материал р-типа — полупроводниковый материал, легированный трехвалентным материалом.

Полусумматор — суммирующая цепь, которая не учитывает переносы.

Понижающий трансформатор — трансформатор, у которого напряжение на вторичной обмотке меньше, чем на первичной.

Последовательная цепь — обеспечивает один путь для тока.

Последовательное соединение элементов — соединение положительного вывода элемента с отрицательным выводом другого элемента и т.д.

Последовательно-параллельная цепь — комбинация последовательной цепи и параллельной цепи.

Последовательно-параллельное соединение элементов — используется для увеличения выходного тока и получения напряжения большего, чем от одного элемента.

Последовательно-препятствующее соединение элементов — соединение отрицательного вывода одного элемента с отрицательным выводом другого элемента или положительного вывода одного элемента с положительным выводом другого элемента.

Последовательный регулятор напряжения — включается последовательно с нагрузкой.

Постоянная времени — величина RC или L/R в соответствующих цепях.

Постоянный конденсатор — конденсатор, имеющий определенное значение емкости, которое не может быть изменено.



Постоянный магнит — магнит, который сохраняет свои магнитные свойства.

Постоянный ток — ток, который течет только в одном направлении.

Потенциал — способность производить работу.

Потенциальный барьер — разность потенциалов, возникающая вблизи контакта материалов n-типа и p-типа.

Потенциометр — переменный резистор, используемый для управления напряжением.

Предел измерений — максимальное значение, показываемое измерительным прибором.

Провал — имеет место, когда задний фронт импульса превышает свое обычное минимальное значение.

Проверка цепи на обрыв — проверка цепи на обрыв, короткое замыкание или замкнутость с помощью омметра.

Проводимость — способность материала пропускать электрический ток.

Проводник — материал, который содержит большое количество свободных электронов.

Программа — список последовательно расположенных инструкций для компьютера для решения определенной задачи.

Протон — положительно заряженная частица в ядре атома.

Пьезоэлектрический эффект — возникновение напряжения на кристалле при прикладывании к нему давления.

Пятивалентный — атом с пятью валентными электронами.

Размах колебаний — вертикальное расстояние от одного пика до другого.

Размыкатель цепи — устройство, которое выполняет те же функции, что и плавкий предохранитель, но не нуждается в замене.

Разностный усилитель — усилитель, который вычитает один сигнал из другого.

Разность потенциалов — причина направленного перемещения электронов в проводнике.



Разомкнутая цепь — имеет бесконечное сопротивление, поскольку по ней не может течь ток.

Реверсивный счетчик — счетчик, который может считать в любом направлении.

Регистр кода условия — регистр, который отслеживает состояние микропроцессора.

Регистр сдвига — состоит из триггеров и используется для временного хранения данных.

Режим замкнутого контура — работа операционного усилителя с использованием обратной связи.

Режим обеднения — режим, при котором электроны проводят до тех пор, пока они обеднены приложенным к затвору напряжением смещения в МОП полевых транзисторах.

Режим разомкнутой петли — режим работы операционного усилителя без использования обратной связи.

Резисторы — компоненты, выпускаемые с определенными значениями сопротивления.

Релаксационный генератор — генератор, который сохраняет энергию в течение части периода колебаний.

Реле — электромагнитный переключатель, который включается и выключается с помощью якоря.

Реостат — переменный резистор, используемый для управления током.

Свет — электромагнитное излучение, которое воспринимается человеческим глазом.

Светодиод — преобразует электрическую энергию непосредственно в световую.

Связь — объединение двух усилительных цепей вместе.

Сименс — единица измерения проводимости.

Синфазно — когда два сигнала одновременно изменяют полярность.

Синхронный — одновременный.

Скважность — отношение ширины импульса к его периоду.

Сложение векторов — сложение векторов с помощью соответствующих графических правил.



Смесь — физическая комбинация элементов и соединений.

Смещение в прямом направлении — на элемент подано напряжение смещения, такое, что ток течет в прямом направлении.

Соединение — комбинация двух или более элементов.

Соленоид — цилиндрическая катушка, с перемещаемым внутри нее сердечником.

Солнечный элемент — см. *Фотогальванический элемент*.

Сопротивление — противодействие протеканию электронов в цепи.

Среднеквадратичное значение — другое название эффективного значения.

Стабилизатор напряжения — выдает постоянное выходное напряжение независимо от напряжения нагрузки.

Стабилитрон — рассчитан для работы при напряжениях, которые превышают напряжение пробоя.

Стек — область памяти, используемая для временного хранения данных.

Степень вращения — угол, на который повернулся якорь.

Сумматор — логическая цепь, выполняющая сложение двух двоичных чисел.

Суммирующий усилитель — используется для смешивания двух сигналов звуковой частоты.

Счетчик — логическая цепь, которая может считать последовательность чисел.

Счетчик команд — содержит адреса команд программы.

Тактируемый триггер — триггер, который имеет третий вход, называемый тактовым.

Термопара — устройство, используемое для преобразования тепловой энергии в электрическую.

Тиристоры — широкий класс полупроводниковых устройств, используемых в качестве электронных переключателей.

Ток — медленный дрейф электронов.



Транзистор — см. *Биполярный транзистор*.

Трансформатор — устройство для передачи энергии из одной цепи в другую.

Трехвалентный — атом с тремя валентными электронами.

Триак — симметричный триодный тиристор, обеспечивает полное управление переменным током.

Триггер — бистабильный мультивибратор, на выходе которого может быть либо высокий, либо низкий уровень. См. *Бистабильный мультивибратор*.

Триггер Шмитта — модифицированный бистабильный мультивибратор, который обеспечивает лучшее восстановление.

Удвоитель напряжения — выдает постоянное напряжение, вдвое большее пикового значения входного.

Удельное сопротивление — величина сопротивления стандартного образца какого-либо материала протеканию тока.

Указатель стека — регистр, который сохраняет адреса ячеек памяти данных, помещенных в стек.

Умножитель напряжения — цепь, способная выдавать высокое постоянное напряжение без использования трансформатора.

Усиление — увеличение амплитуды сигнала.

Усилители радиочастоты — усиливают сигналы от 10 МГц до 30 МГц.

Усилитель звуковой частоты — усиливает сигналы переменного тока в диапазоне звуковых частот от 20 до 20 000 герц.

Усилитель класса А — усилитель, смещенный таким образом, что ток через него течет в течение всего периода.

Усилитель класса АВ — усилитель, смещенный таким образом, что ток через него течет в течение времени, большего половины периода.

Усилитель класса В — усилитель, смещенный таким образом, что ток через него течет только половину периода входного напряжения.

Усилитель класса С — усилитель, смещенный таким образом, что ток через него течет в течение времени, меньшего половины периода входного напряжения.



Усилитель мощности — усилитель звуковой частоты, предназначенный для работы на специальную нагрузку.

Усилитель напряжения — усилитель звуковой частоты, используемый для получения высокого усиления.

Усилитель постоянного тока — см. *Усилитель с гальванической связью*.

Усилитель промежуточной частоты — одночастотный усилитель.

Усилитель с гальванической связью — обеспечивает усиление напряжения низкой частоты и постоянного тока.

Усилитель с общей базой — усилитель, в котором база является общей по отношению ко входу и выходу.

Усилитель с общим коллектором — усилитель, в котором коллектор является общим по отношению ко входу и выходу.

Усилитель с общим эмиттером — усилитель, в котором эмиттер является общим по отношению ко входу и выходу.

Утроитель напряжения — выдает постоянное напряжение втрое большее пикового значения входного.

Фазовый угол — точный сдвиг фаз между входом и выходом.

Фазосдвигающая цепь — сдвигает фазу выходного сигнала по отношению ко входному.

Фарада — основная единица измерения емкости.

Фиксирующая цепь — цепь, используемая для фиксации по постоянному току верхнего или нижнего уровня сигнала переменного тока.

Фильтр — преобразует пульсирующее напряжение постоянного тока в сглаженное напряжение постоянного тока.

Фильтр верхних частот — фильтр, который пропускает высокие частоты и ослабляет низкие.

Фильтр нижних частот — фильтр, который пропускает низкие частоты и ослабляет высокие.

Фотогальванический (солнечный) элемент — устройство, используемое для преобразования световой энергии в электрическую.



Фотодиод — используется для управления током с помощью световой энергии.

Фоторезистор — способен изменять свое сопротивление при изменении интенсивности света.

Фототранзистор — работает как фотодиод, но имеет больший выходной ток.

Фронт — передний край импульса.

Химический источник тока — элемент, используемый для преобразования химической энергии в электрическую.

Цепь НЕ — выполняет логическую функцию НЕ.

Цикл — два полных чередования переменного тока, независимо от времени.

Цифровой измерительный прибор — измерительный прибор, который обеспечивает цифровой отсчет.

Частота — число колебаний в единицу времени.

Частота основной гармоник — представляет скорость повторения колебания.

Частотомер — измеряет частоту путем сравнения ее с известной частотой.

Шифратор — логическая цепь с одним или более входами, которая создает на выходе двоичное число.

Шунт — любая деталь подключенная параллельно другой детали.

Электродвижущая сила (эдс) — другое название разности потенциалов.

Электромагнит — магнит, полученный путем пропускания тока через катушку.

Электромагнитная индукция — явление возникновения напряжения в проводнике при изменении магнитного поля.

Электрон — элементарная частица с отрицательным зарядом, вращаясь вокруг ядра, является составной частью атома.

Элемент — устройство для получения электрической энергии путем погружения двух различных металлов, например, меди и цинка, в раствор соли, кислоты или щелочи.

Элемент — совокупность атомов, имеющих одинаковый заряд ядра.



Элемент И — выполняет основную логическую операцию умножения.

Элемент ИЛИ — выполняет логическую операцию сложения.

Элемент «Исключающее ИЛИ» — создает на выходе низкий уровень только тогда, когда на оба входа поданы высокие уровни.

Элемент «Исключающее НЕ-ИЛИ» — создает на выходе высокий уровень только тогда, когда на оба входа поданы высокие уровни.

Элемент НЕ-И — комбинация инвертора и элемента И.

Элемент НЕ-ИЛИ — комбинация инвертора и элемента ИЛИ.

Эмиттерный повторитель — другое название усилителя с общим эмиттером, в котором напряжение на эмиттере повторяет напряжение на базе.

Эффективное значение — значение постоянного тока, который выделяет в данном проводнике такое же количество тепла, что и определяемый переменный ток.

Ядро — центральная часть атома, которая содержит основную массу атома.

Якорь — перемещающаяся часть магнитной цепи.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение 1. СОКРАЩЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ

Термин	Сокращение	Термин	Сокращение
Альфа	α	Кулон	Кл
Ампер	A	Мега	M
Бета	β	Микро	мк
Ватт	Вт	Милли	м
Вольт	В	Мощность	P
Вольт-Ампер	В·А	Нано	н
Время	t	Ом	ом
Генри	Гн	Период	T
Герц	Гц	Пико	п
Гига	Г	Проводимость	σ
Градусы по Фаренгейту	°	Реактивное сопротивление	X
Градусы по Цельсию	°C	Резонансная частота	f _P
Длина волны	λ	Секунда	с
Емкостное сопротивление	X _C	Сименс	См
Емкость	C	Сопротивление	R
Заряд	q	Ток	I
Импеданс	Z	Фарада	Ф
Индуктивное сопротивление	X _L	Частота	f
Индуктивность	L	Электродвижущая сила	э.д.с.
Кило	К		



Приложение 2. ГРЕЧЕСКИЙ АЛФАВИТ

Греческая буква	Название
Α α	альфа
Β β	бета
Γ γ	гамма
Δ δ	дельта
Ε ε	эпсилон
Ζ ζ	дзета
Η η	эта
Θ θ	тета
Ι ι	иота
Κ κ	каппа
Λ λ	ламбда
Μ μ	мю
Ν ν	ию
Ξ ξ	кси
Ο ο	омикрон
Π π	пи
Ρ ρ	ро
Σ σ	сигма
Τ τ	тау
Υ υ	ипсилон
Φ φ	фи
Χ χ	хи
Ψ ψ	пси
Ω ω	омега

Приложение 3. ЧАСТО ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРЕФИКСЫ

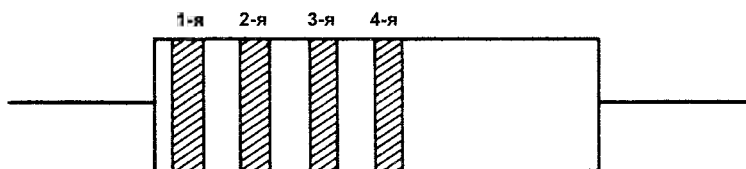
Префикс	Символ	Значение
Мега-	М	10^6
кило-	к	10^3
милли-	м	10^{-3}
микро-	μ	10^{-6}
пико-	р	10^{-12}



Приложение 4. ЦВЕТОВАЯ КОДИРОВКА РЕЗИСТОРОВ

Черный	0		
Коричневый	1		
Красный	2		
Оранжевый	3		
Желтый	4		
Зеленый	5	Золотой	5%
Синий	6	Серебряный	10%
Фиолетовый	7	Отсутствует	20%
Серый	8		
Белый	9		

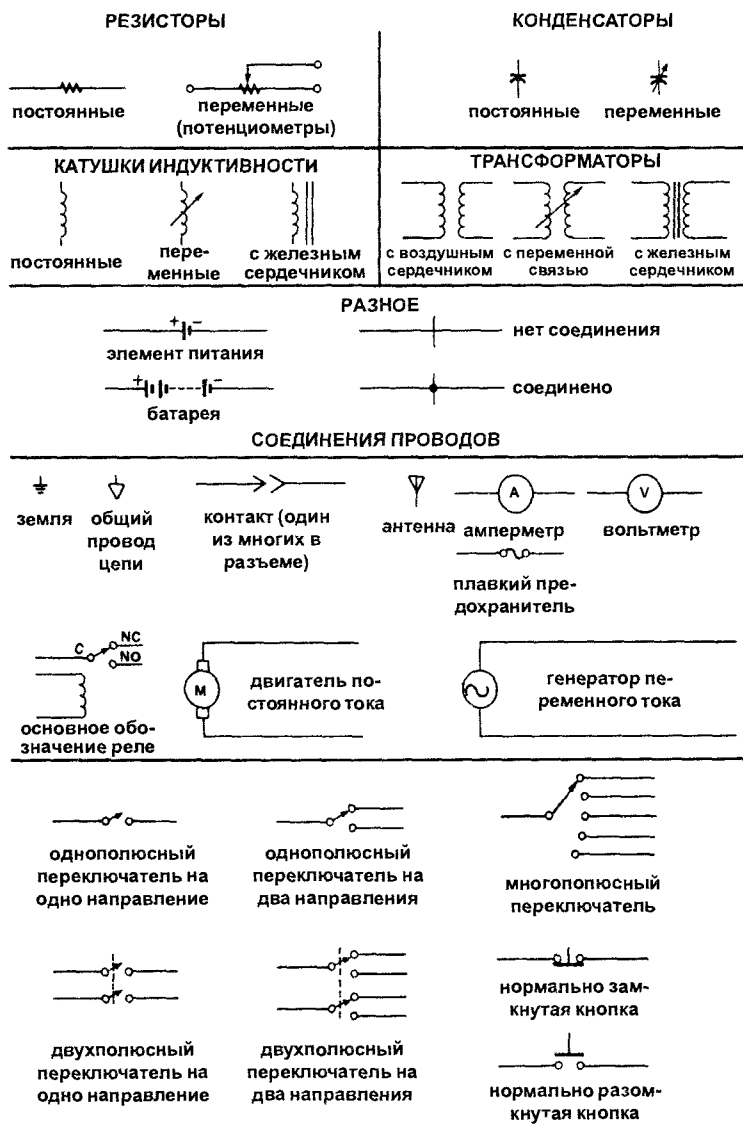
Допуск



Цвет	Первая полоса Первая цифра	Вторая полоса Вторая цифра	Третья полоса Количество нулей	Четвертая полоса Допуск
Черный	—	0	0	—
Коричневый	1	1	00	—
Красный	2	2	000	—
Оранжевый	3	3	0000	—
Желтый	4	4	00000	—
Зеленый	5	5	000000	—
Синий	6	6		—
Фиолетовый	7	7		—
Серый	8	8		—
Белый	9	9		—
Золотой	—	—	x 0,1	5%
Серебряный	—	—	x 0,01	10%
Отсутствует	—	—	—	20%

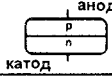
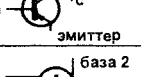
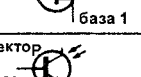
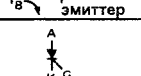
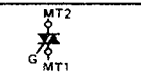
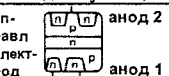
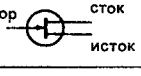
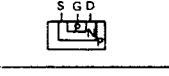
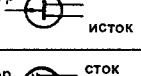
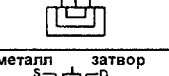
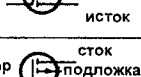
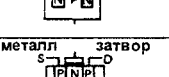
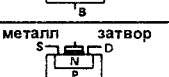
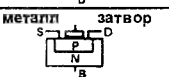
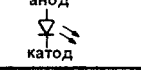
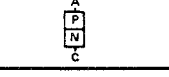


Приложение 5. ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРОНИКЕ





Приложение 6. СХЕМАТИЧЕСКИЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ УСТРОЙСТВ

НАЗВАНИЕ УСТРОЙСТВА	ОБОЗНАЧЕНИЕ НА СХЕМЕ	ОБЫЧНО ИСПОЛЬЗУЕМАЯ СХЕМА P-N-ПЕРЕХОДОВ	ОСНОВНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ
Диод или выпрямитель			Выпрямление Блокировка Детектирование Управление
p-р-п транзистор			Усиление Переключение Генерация
р-р-р транзистор			Усиление Переключение Генерация
Однопереходной транзистор			Генерация временных интервалов Детектор уровня Запуск КУВ
Фототранзистор			Устройство считывания с ленты, Устройство для считывания с перфокарт, Датчик положения, Тахометры
Кремниевый управляемый вентиль (КУВ)			Регулирование мощности, Управление фазой Преобразователи Прерыватели
Триак			Переключение переменного тока Управление фазой Замена реле
Полевой транзистор с каналом n-типа			Усиление Переключение Генерация
Полевой транзистор с каналом p-типа			Усиление Переключение Генерация
Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП) обогащенного типа с n-каналом			Переключение Применение в цифровой технике
Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП) обогащенного типа с p-каналом			Переключение Применение в цифровой технике
Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП) обедненного типа с n-каналом			Переключение Усиление
Полевой транзистор с изолированным затвором (МОП) обедненного типа с p-каналом			Переключение Усиление
Светоизлучающий диод (светодиод)			Индикатор Источник света Оптопары Дисплеи



Приложение 7. ОБОЗНАЧЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЦИФРОВОЙ ЛОГИКИ



Элемент ИЛИ



Элемент И



Элемент НЕ-ИЛИ



Элемент НЕ-И



Элемент «Исключающее ИЛИ»



Элемент «Исключающее НЕ-ИЛИ»

Приложение 8. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КАЛЬКУЛЯТОРА

Благодаря дешевизне, электронные микрокалькуляторы стали очень популярны. Многие студенты рады тому, что работу по расчетам за них теперь выполняет калькулятор; несколько нажатий клавиш — и калькулятор дает правильный ответ. Однако не все студенты осознают, что калькулятор — это только инструмент для быстрого выполнения вычислений, и не гарантирует правильный ответ. Калькулятор дает правильный ответ только тогда, когда в него введены правильные числа в правильном порядке и нужные функциональные клавиши используются в соответствующее время.

Если операторы не понимают принципов математического процесса, они не смогут правильно ввести данные в калькулятор и интерпретировать результаты. Необходимо обладать определенными математическими навыками. Даже когда все данные введены правильно, ответ все же



может оказаться неправильным из-за вышедших из строя батарей и т.п.

Выбор калькулятора для вычислений в электронике — это важная проблема. Рынок наполнен самыми разнообразными моделями. Какую из них выбрать? Какие функции окажутся наиболее полезными? Для этого курса выберите калькулятор со следующими функциями: $+$, $-$, $\times$, $\div$, $1/x$, x^2 и $\sqrt{}$. Функция памяти необязательна. Приобрели популярность программируемые калькуляторы. Хотя для этого курса в них нет необходимости, они обычно содержат формулы и функции, используемые в тригонометрии и статистике. Если вы решили приобрести его, то внимательно изучите инструкцию по эксплуатации для использования всех его возможностей. Обычно все калькуляторы продаются с инструкцией. Держите ее под рукой.

Следующие примеры покажут, как использовать калькулятор для решения различных задач в электронике. Включите ваш калькулятор. Проверьте клавиатуру. Давайте немного повычислим.

Сложение

Пример 1. Сложить: $39\,857 + 19\,733$

<i>Решение</i>	<i>Ввод</i>	<i>Дисплей</i>
	$\boxed{3}\boxed{9}\boxed{8}\boxed{5}\boxed{7}$	39857
	$\boxed{+}$	39857
	$\boxed{1}\boxed{9}\boxed{7}\boxed{3}\boxed{3}$	19733
	$\boxed{=}$	59590

Деление

Пример 2. Вычесть: $30\,102 - 15\,249$

<i>Решение</i>	<i>Ввод</i>	<i>Дисплей</i>
	$\boxed{3}\boxed{0}\boxed{1}\boxed{0}\boxed{2}$	30102
	$\boxed{-}$	30102
	$\boxed{1}\boxed{5}\boxed{2}\boxed{4}\boxed{9}$	15249
	$\boxed{=}$	14853

**Умножение****Пример 3.** Умножить: $33\,545 \times 981$ *Решение*

Ввод	Дисплей
$\boxed{3}\boxed{3}\boxed{5}\boxed{4}\boxed{5}$	33545
$\boxed{\times}$	33545
$\boxed{9}\boxed{8}\boxed{1}$	981
$\boxed{=}$	32907645

Деление**Пример 4.** Разделить 36 980 на 43*Решение*

Ввод	Дисплей
$\boxed{3}\boxed{6}\boxed{9}\boxed{8}\boxed{0}$	36980
$\boxed{\div}$	36980
$\boxed{4}\boxed{3}$	43
$\boxed{=}$	860

Извлечение корня**Пример 5.** Извлечь квадратный корень из 35 721*Решение*

Ввод	Дисплей
$\boxed{3}\boxed{5}\boxed{7}\boxed{2}\boxed{1}$	35721
$\boxed{\sqrt{}}$	189

Полное сопротивление параллельной цепи

Полное сопротивление параллельной цепи может быть вычислено путем определения обратных величин сопротивлений каждой ветви, их сложения и вычисления полного сопротивления всей цепи, как обратной величины полученной суммы.

Параллельные цепи состоят из резисторов, сопротивление которых измеряется в омах. Вычисление полного сопротивления параллельной цепи включает вычисление обратных величин ($1/R$) по формуле:

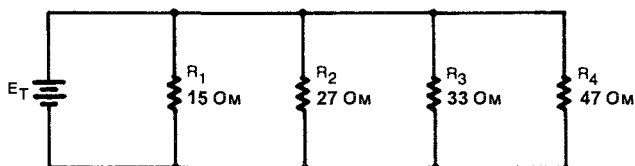
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}.$$

Калькулятор вычисляет обратную величину числа путем простого нажатия клавиши $1/x$. Если калькулятор не



имеет клавиши $1/x$, то каждая обратная величина должна быть найдена отдельно путем деления 1 на значение сопротивления.

Пример 6. Вычислить полное эквивалентное сопротивление изображенной параллельной цепи.



Без функции Память

Решение	Ввод	Дисплей
Обратная величина R_1	1 5 $1/x$	15 0,0666667
Обратная величина R_2	2 7 $1/x$	27 0,037037
Обратная величина R_3	3 3 $1/x$	33 0,030303
Обратная величина R_4	4 7 $1/x$	47 0,0212766
Сумма обратных величин	Ввод	Дисплей
	0,0666667	0,0666667
	+	0,0666667
	0,037037	0,1037037
	+	0,1037037
	0,030303	0,1340067
	+	0,1340067
	0,0212766	0,1552833
	=	0,1552833
Обратная величина суммы	Ввод	Дисплей
	$1/x$	6,4398425
Округлим ответ до 6,44 Ом		
С функцией Память		
Решение	Ввод	Дисплей
Обратная величина R_1	1 5	15



	1/x	0,0666667
	M+	0,0666667 M
	C	0
Обратная величина R_2	2 7	27
	1/x	0,037037
	M+	0,037037 M
	C	0
Обратная величина R_3	3 3	33
	1/x	0,030303
	M+	0,030303 M
	C	0
Обратная величина R_4	4 7	47
	1/x	0,0212766
	M+	0,0212766 M
	C	0
Сумма обратных величин	RM	0,155283329
Обратная величина суммы	1/x	6,439841299
		Округлим ответ до 6,44 Ом

Округление

Замечание: Округление не является функцией калькулятора и должно производиться в уме. Количество значащих цифр может быть уменьшено путем округления. Это означает отбрасывание младших значащих цифр до тех пор, пока не останется желаемое количество цифр после запятой. Новая младшая значащая цифра может быть изменена с помощью следующих правил округления.

Если старшая отбрасываемая цифра

- меньше 5, то последняя остающаяся значащая цифра не изменяется;
- больше 5, то последняя остающаяся значащая цифра увеличивается на 1;
- равна 5, то последняя остающаяся значащая цифра не изменяется, если она четная;
- равна 5, то последняя остающаяся значащая цифра увеличивается на 1, если она нечетная.



Пример: Округлить 352,580

Округление до одной десятой 352,6

Округление до целого числа 352

Округление до сотен 400

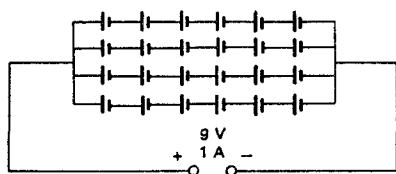
Техника округления с помощью этих правил, в среднем, дает высокую надежность.



Глава 3. НАПРЯЖЕНИЕ

1. Работа, выполняемая в цепи (движение электронов), пропорциональна приложенной разности потенциалов (напряжению) и величине заряда.
2. Электричество может быть получено посредством трения, при изменении магнитного поля, посредством химических реакций, с помощью света, тепла и давления.
3. Вторичные элементы характеризуются емкостью, которая измеряется в ампер-часах.

4.



5. Дано:

9 В

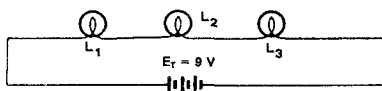
3 В (номинальное)

3 В (номинальное)

6 В (номинальное)

Решение:

Нарисуем цепь:



Половина напряжения будет падать на L_1 и L_2 , а другая половина напряжения будет падать на L_3 . Следовательно:

$L_1 + L_2 = 6$ В падение Падение напряжения на L_3 — 4,5 В

$L_3 = 6$ В падение Падение напряжения на L_2 — 2,25 В

$9 \times \frac{1}{2} = 4,5$ В Падение напряжения на L_1 — 2,25 В

Общее падение напряжения 9,00 В.

Глава 4. СОПРОТИВЛЕНИЕ

1. Сопротивление материала зависит от его размеров, формы, температуры и удельного сопротивления. Удельное сопротивление материала — это сопротивление эталонного образца из этого материала при температуре 20 градусов Цельсия.

2. Дано:

Решение:

Сопротивление = 2200 Ом $2200 \times 0,10 = 220$ Ом



Допуск = 10%

$$2200 - 220 = 1980 \text{ Ом}$$

$$2200 + 220 = 2420 \text{ Ом.}$$

Пределы допуска: от

1980 Ом до 2420 Ом.

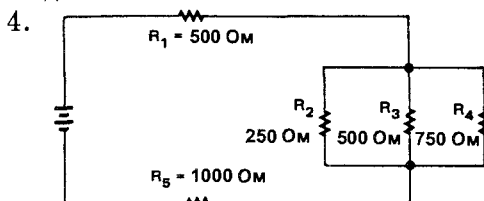
3. а. $5\text{K}1 \pm 5\%$

б. $1\text{M}5 \pm 10\%$

в. $2\text{R}7 \pm 5\%$

г. $100\text{R} \pm 20\%$

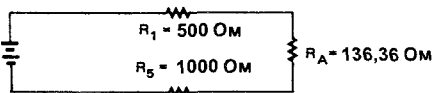
д. $470\text{K} \pm 10\%$



$$R_T = R_1 + R_5 + R_A$$

$$R_T = 500 + 1000 + 136,36$$

$$R_T = 1636,36 \text{ Ом (Ответ)}$$



5. Ток электронов течет от отрицательного вывода источника тока через последовательно включенные компоненты, делится между ветвями параллельно включенных компонент, складывается после прохождения параллельных компонент, снова течет через последовательные или параллельные компоненты, и приходит к положительному выводу источника тока.

Глава 5. ЗАКОН ОМА

1. Дано:

$$I = ?$$

$$E = 9 \text{ В}$$

$$R = 4500 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{9}{4500}$$

$$I = 0,002 \text{ А или } 2 \text{ мА.}$$

2. Дано:

$$I = 250 \text{ мА} =$$

$$= 0,25 \text{ А}$$

Решение:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{E}{470} = 0,25 \text{ А}$$



$$E = ?$$

$$R = 470 \text{ Ом.}$$

$$\frac{0,25}{1} \times \frac{E}{470} \text{ (перекрестное умножение)}$$

$$E = (0,25)(470) = 117,5 \text{ В.}$$

3. Дано:

$$I = 10 \text{ А}$$

$$E = 240 \text{ В}$$

$$R = ?$$

Решение:

$$I = \frac{E}{R} = \frac{240}{R} = 10 \text{ А}$$

$$\frac{10}{1} \times \frac{240}{R} \text{ (перекрестное умножение)}$$

$$\frac{240}{10} = 1R$$

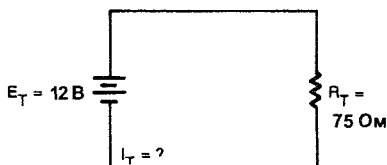
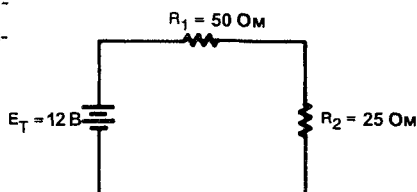
$$R = 24 \text{ Ома.}$$

4. а. Сначала найдем полное сопротивление последовательной цепи.

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 50 + 25$$

$$R_T = 75 \text{ Ом.}$$



Во-вторых, перерисуем цепь, используя эквивалентное полное сопротивление.

В третьих, найдем полный ток в цепи.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R_T = 75 \text{ Ом.}$$

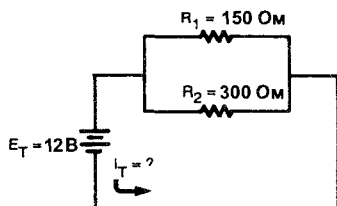
Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{75}$$

$$I_T = 0,16 \text{ А или } 160 \text{ мА.}$$

б. Сначала найдем полное сопротивление параллельной цепи.

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$





$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{150} + \frac{1}{300}$$

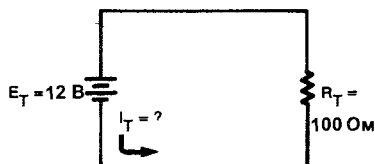
$$\frac{1}{R_T} = \frac{3}{300}$$

$$(3)(R_T) = (1)(300)$$

$$R_T = \frac{300}{3} = 100 \text{ Ом.}$$

Во-вторых, перерисуем цепь с эквивалентным сопротивлением.

В третьих, найдем общий ток в цепи.



Дано:

$$I = ?$$

$$E = 12 \text{ В}$$

$$R = 100 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{100}$$

$$I = 0,12 \text{ А или } 120 \text{ мА.}$$

в. Сначала найдем эквивалентное сопротивление параллельной части цепи.

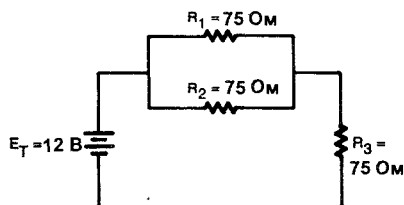
$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{75} + \frac{1}{75}$$

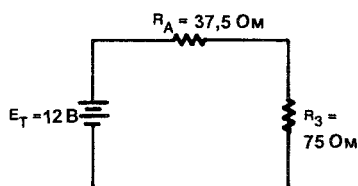
$$\frac{1}{R_A} = \frac{2}{75}$$

$$1R_A = \frac{75}{2}$$

$$R_A = 37,5 \text{ Ом.}$$



Во-вторых, перерисуем цепь с эквивалентным сопротивлением.





В третьих, найдем общее сопротивление цепи.

$$R_T = R_A + R_3 = 37,5 + 75$$

$$R_T = 112,5 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем общий ток в цепи.

Дано:

Решение:

$$I = ?$$

$$E = 12 \text{ В}$$

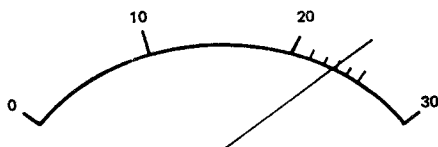
$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{112,5}$$

$$R = 112,5 \text{ Ом.}$$

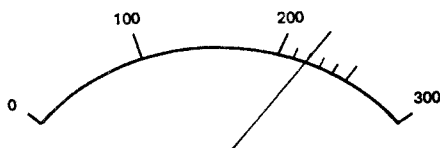
$$I = 0,107 \text{ А или } 107 \text{ мА.}$$

Глава 6. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ — ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

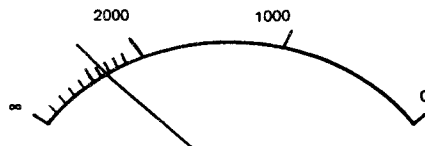
1. Цифровой.
2. Аналоговый.
3. а. 23 Вольта.



- б. 220 миллиампер.



- в. 2700 Ом.



4. Один и тот же прибор может быть использован для измерения напряжения, тока и сопротивления.

Глава 7. МОЩНОСТЬ

1. Дано:

Решение:

$$P = ?$$

$$P = IE = (0,04)(30)$$

$$I = 40 \text{ мА} = 0,04 \text{ А} \quad P = 1,2 \text{ Вт.}$$

$$E = 30 \text{ В.}$$



2. Дано:

$$P = 1 \text{ Ватт}$$

$$I = 10 \text{ мА} =$$

$$= 0,01 \text{ А}$$

$$E = ?$$

Решение:

$$P = IE$$

$$1 = (0,01)(E)$$

$$\frac{1}{0,01} = 1E$$

$$100 \text{ Вольт} = E.$$

3. Дано:

$$P = 12,3 \text{ Ватт}$$

$$I = ?$$

$$E = 30 \text{ Вольт.}$$

Решение:

$$P = IE$$

$$12,3 = (I)(30)$$

$$\frac{12,3}{30} = 1I$$

$$I = 0,41 \text{ А или } 410 \text{ мА.}$$

4. а. Сначала найдем полное сопротивление последовательной цепи.

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 5600 + 5600$$

$$R_T = 11200 \text{ Ом.}$$

Во-вторых, перерисуем цепь, используя эквивалентное полное сопротивление.

В третьих, найдем полный ток в цепи.

Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = 11200 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{11200}$$

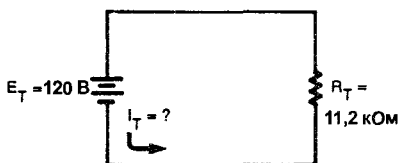
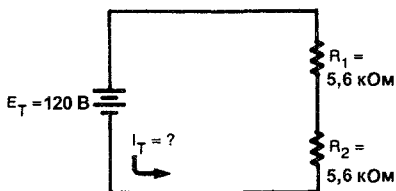
$$I_T = 0,0107 \text{ А или } 10,7 \text{ мА.}$$

Теперь найдем полную мощность в цепи.

$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,0107)(120) = 1,3 \text{ Вт.}$$

б. Сначала найдем полное сопротивление параллельной цепи.





$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{1000} + \frac{1}{2200}$$

$$\frac{1}{R_T} = 0,001455$$

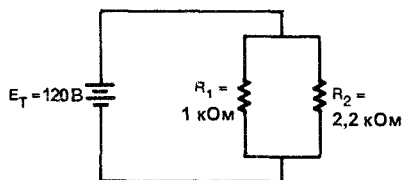
$$\frac{1}{R_T} = \frac{0,001455}{1}$$

$$R_T = \frac{1}{0,001455}$$

$$R_T = 687,29 \text{ Ом.}$$

Во-вторых, перерисуем цепь, используя эквивалентное полное сопротивление.

В третьих, найдем полный ток в цепи.



Дано:

$$I = ?$$

$$E = 120 \text{ В}$$

$$R = 687,29 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{687,29}$$

$$I_T = 0,175 \text{ А или } 175 \text{ мА.}$$

Теперь найдем полную мощность в цепи.

Дано:

$$P_T = ?$$

$$I_T = 0,175 \text{ А}$$

$$E_T = 120 \text{ Вольт.}$$

Решение:

$$P_T = I_T E_T$$

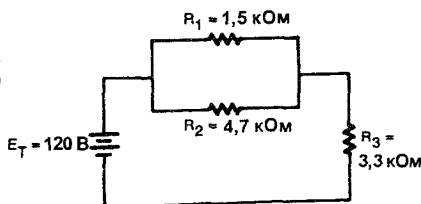
$$P_T = (0,175)(120)$$

$$P_T = 21 \text{ Вт.}$$

в. Сначала найдем эквивалентное сопротивление параллельной части цепи.

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{1500} + \frac{1}{4700}$$

$$\frac{1}{R_A} = 0,000880$$





$$R_A = \frac{1}{0,000880}$$

$$R_A = 1136,36 \text{ Ом.}$$

Во-вторых, перерисуем цепь с эквивалентным сопротивлением.

В третьих, найдем полное сопротивление цепи.

$$R_T = R_A + R_3$$

$$R_T = 1136,36 + 3300$$

$$R_T = 4436,36 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем общий ток в цепи.

Дано:

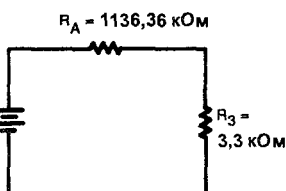
Решение:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = 4436,36 \text{ Ом. } I_T = 0,027 \text{ А или } 27 \text{ мА.}$$

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{4436,36}$$



Найдем полную мощность в цепи.

Дано:

Решение:

$$P_T = ?$$

$$I_T = 0,027 \text{ А}$$

$$E_T = 120 \text{ Вольт.}$$

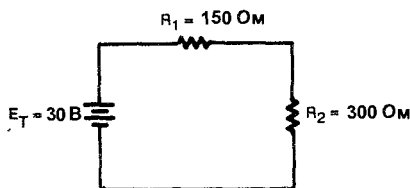
$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,027)(120)$$

$$P_T = 3,246 \text{ Вт.}$$

Глава 8. ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

1. а. Сначала найдем полное сопротивление последовательной цепи.



$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 150 + 300$$

$$R_T = 450 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь, используя эквивалентное полное сопротивление.

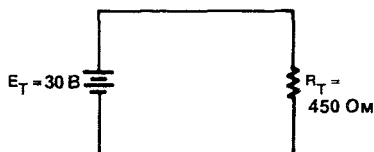
Найдем полный ток в цепи.

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{30}{450}$$



$$I_T = 0,0667 \text{ А или } 66,7 \text{ мА.}$$

Найдем падение напряжения на каждом резисторе.



$I_T = I_1 + I_2$ (в последовательной цепи ток одинаков во всей цепи)

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$0,0667 = \frac{E_{R_1}}{150}$$

$$0,0667 = \frac{E_{R_2}}{300}$$

$$E_{R_1} = (0,0667)(150)$$

$$E_{R_2} = (0,0667)(300)$$

$$E_{R_1} = 10 \text{ В.}$$

$$E_{R_2} = 20 \text{ В.}$$

Найдем мощность, рассеиваемую на каждом резисторе.

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_1} = (0,0667)(10) \quad P_{R_2} = (0,0667)(20)$$

$$P_{R_1} = 0,667 \text{ Вт} \quad P_{R_2} = 1,334 \text{ Вт.}$$

Найдем полную мощность цепи.

$$P_T = I_T E_T \quad \text{или} \quad P_T = P_{R_1} + P_{R_2}$$

$$P_T = (0,0667)(30) \quad P_T = 0,667 + 1,334$$

$$P_T = 2,001 \text{ Вт}$$

$$P_T = 2,001 \text{ Вт.}$$

- б. Сначала найдем полное сопротивление цепи.

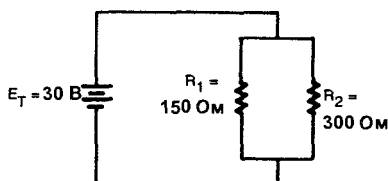
$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{1}{150} + \frac{1}{300}$$

$$\frac{1}{R_T} = \frac{3}{300}$$

$$(3)(R_T) = (1)(300)$$

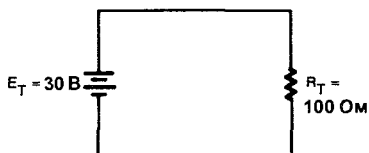
$$R_T = \frac{300}{3} = 100 \text{ Ом.}$$





Перерисуем эквивалентную цепь.

Найдем полный ток в цепи.



$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{30}{100}$$

$$I = 0,3 \text{ А или } 300 \text{ мА.}$$

Найдем ток в каждой ветви параллельной цепи. Напряжение на всех ветвях параллельной цепи одинаково.

$$E_T = E_1 = E_2$$

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$I_{R_1} = \frac{30}{150}$$

$$I_{R_2} = \frac{30}{300}$$

$$I_{R_1} = 0,2 \text{ А}$$

$$I_{R_2} = 0,1 \text{ А.}$$

Найдем мощность, рассеиваемую каждым резистором.

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_1} = (0,2)(30)$$

$$P_{R_2} = (0,1)(30)$$

$$P_{R_1} = 6 \text{ Вт}$$

$$P_{R_2} = 3 \text{ Вт.}$$

Найдем полную мощность цепи.

$$P_T = I_T E_T$$

$$P_T = (0,3)(30)$$

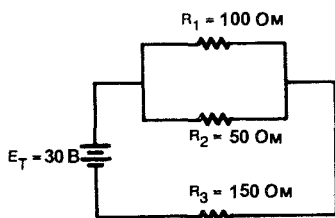
$$P_T = 9 \text{ Вт.}$$

в. Сначала найдем эквивалентное сопротивление параллельной части цепи.

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{1}{100} + \frac{1}{50}$$

$$\frac{1}{R_A} = \frac{3}{300}$$





$$(3)(R_A) = (1)(100)$$

$$R_A = \frac{100}{3} = 33,3 \text{ Ом.}$$

Перерисуем цепь.

Найдем полное сопротивление цепи.

$$R_T = R_A + R_3$$

$$R_T = 33,3 + 150 = 183,3 \text{ Ом.}$$

Теперь найдем общий ток (I_T) в эквивалентной цепи.

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{30}{183,3}$$

$$I_T = 0,164 \text{ А или } 164 \text{ мА.}$$

Найдем падения напряжения на резисторах в эквивалентной цепи. (В последовательной цепи ток одинаков во всей цепи).

$$I_T = I_{R_A} = I_{R_3}$$

$$I_{R_A} = \frac{E_{R_A}}{R_A}$$

$$0,164 = \frac{E_{R_A}}{33,3}$$

$$E_{R_A} = 5,45 \text{ В}$$

$$I_{R_3} = \frac{E_{R_3}}{R_3}$$

$$0,164 = \frac{E_{R_3}}{150}$$

$$E_{R_3} = 24,6 \text{ В.}$$

Найдем ток через каждый из резисторов в параллельной части цепи.

$$I_{R_1} = \frac{E_{R_1}}{R_1}$$

$$I_{R_1} = \frac{5,45}{100}$$

$$I_{R_1} = 0,0545 \text{ А}$$

$$I_{R_2} = \frac{E_{R_2}}{R_2}$$

$$I_{R_2} = \frac{5,45}{50}$$

$$I_{R_2} = 0,109 \text{ А.}$$

Найдем мощность на каждом сопротивлении цепи.

$$P_T = I_T E_T$$

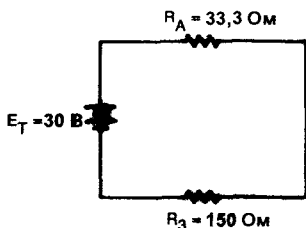
$$P_T = (0,164)(30)$$

$$P_T = 4,92 \text{ Вт}$$

$$P_{R_1} = I_{R_1} E_{R_1}$$

$$P_{R_1} = (0,0545)(5,45)$$

$$P_{R_1} = 0,297 \text{ Вт}$$





$$P_{R_2} = I_{R_2} E_{R_2}$$

$$P_{R_3} = I_{R_3} E_{R_3}$$

$$P_{R_2} = (0,109)(5,45) \quad P_{R_3} = (0,164)(24,6)$$

$$P_{R_2} = 0,594 \text{ Вт}$$

$$P_{R_3} = 4,034 \text{ Вт.}$$

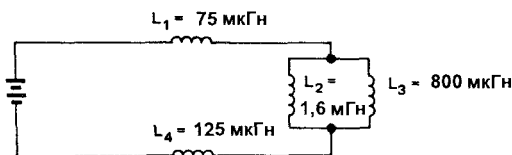
Глава 9. МАГНЕТИЗМ

1. Доменная теория магнетизма может быть подтверждена с помощью простого опыта: достаточно нагреть магнит или ударить по нему молотком, и его домены расположатся хаотично с характерным потрескиванием. Магнит при этом теряет свои магнитные свойства.
2. Сила электромагнита возрастает при увеличении числа витков катушки, при увеличении тока, текущего через проводник, и при помещении в катушку ферромагнитного сердечника.
3. Когда рамка перемещается из положения А в положение В, индуцируемое в ней напряжение возрастает. Когда рамка перемещается в положение С, индуцируемое в ней напряжение падает до нуля. Когда рамка продолжает вращаться и переходит в положение D, в ней опять индуцируется напряжение, но коммутатор меняет его полярность, и оно становится таким же, как и в первом случае (из А в В). Выходное напряжение пульсирует в одном направлении, совершая два колебания от нуля до максимума за один оборот рамки.

Глава 10. ИНДУКТИВНОСТЬ

1. Магнитное поле, создаваемое катушкой индуктивности, может быть увеличено при помещении в нее железного сердечника.

2.



Дано:

$$L_1 = 75 \text{ мкГн}$$

Решение:

Найдем общую индуктивность



$L_2 = 1,6 \text{ мГн} =$ параллельно соединенных ка-
 $= 1600 \text{ мкГн}$ тушек:

$$L_3 = 800 \text{ мкГн} \quad \frac{1}{L_T} = \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} = \frac{1}{1600} + \frac{1}{800}$$

$$L_4 = 125 \text{ мкГн.} \quad \frac{1}{L_T} = \frac{3}{1600}$$

$$L_T = 1342,3 \text{ мкГн}$$

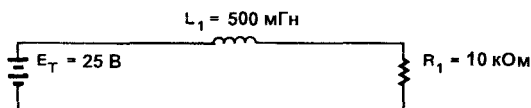
Найдем общую индуктивность цепи:

$$L_T = L_T + L_1 + L_4$$

$$L_T = 1342,3 + 75 + 125 =$$

$$= 1542,3 \text{ Гн.}$$

3. Сначала нарисуем цепь:



Дано:

$$E_T = 25 \text{ В}$$

$$L_1 = 500 \text{ мГн} =$$

$$= 0,5 \text{ Гн}$$

$$R_1 = 10 \text{ кОм} =$$

$$= 10000 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$t = \frac{L}{R}$$

$$t = \frac{0,5}{10000} = 0,00005$$

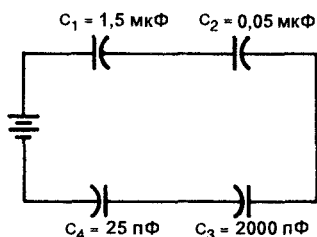
$$t = 50 \text{ мксек.}$$

100 мксек = 2 постоянным времени, по графику можно определить, что ток, а следовательно и напряжение достигли 86,5% от максимальной величины.

$$25 \times 86,5\% = 21,63 \text{ В.}$$

Глава 11. ЕМКОСТЬ

1. Заряд сохраняется на обкладках конденсатора.
2. Сначала нарисуем цепь:





Дано:

$$C_1 = 1,5 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 0,05 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = 2000 \text{ пФ} =$$

$$= 0,002 \text{ мкФ}$$

$$C_4 = 25 \text{ пФ} =$$

$$= 0,000025 \text{ мкФ}.$$

Решение:

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \frac{1}{C_4}$$

$$\frac{1}{C_T} = \frac{1}{1,5} + \frac{1}{0,05} + \frac{1}{0,002} + \frac{1}{0,000025}$$

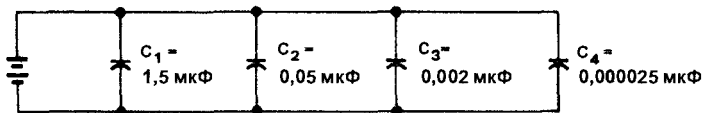
$$\frac{1}{C_T} = 40520,667$$

$$\frac{C_T}{1} = \frac{1}{40520,667}$$

$$C_T = 0,000024678$$

$$C_T = 24,678 \text{ пФ}.$$

3. Сначала нарисуем цепь:



Дано:

$$C_1 = 1,5 \text{ мкФ}$$

$$C_2 = 0,05 \text{ мкФ}$$

$$C_3 = 2000 \text{ пФ} =$$

$$= 0,002 \text{ мкФ}$$

$$C_4 = 25 \text{ пФ} =$$

$$= 0,000025 \text{ мкФ}.$$

Решение:

$$C_T = C_1 + C_2 + C_3 + C_4$$

$$C_T = 1,5 + 0,05 + 0,002 + 0,000025$$

$$C_T = 1,552025 \text{ мкФ или}$$

$$1,55 \text{ мкФ}.$$

Глава 12. ПЕРЕМЕННЫЙ ТОК

1. Для наблюдения электромагнитной индукции, проводник должен перемещаться в магнитном поле.
2. Правило левой руки применяется следующим образом: большой палец указывает направление движения проводника, указательный палец (расположенный под прямым углом к большому) — направление силовых линий магнитного поля от севера к югу, а средний палец (расположенный под прямым углом к ладони) показывает направление тока в проводнике. Правило левой руки используется для определения направления



тока в проводнике, перемещающемся в магнитном поле.

3. Размах колебаний — это вертикальное расстояние между двумя пиками сигнала.
4. Эффективное значение переменного тока — это такое значение постоянного тока, которое выделяет в данном проводнике за то же самое время такое же количество тепла, что и данный переменный ток.

5. а. Прямоугольное колебание



- б. Треугольное колебание



- в. Пилообразное колебание



6. Несинусоидальные колебания могут рассматриваться состоящими из суммы бесконечного числа синусоидальных колебаний, имеющих различные частоты (гармоники) и амплитуды.

Глава 13. ИЗМЕРЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Прибор магнитоэлектрической системы может использоваться для измерения переменного тока при наличии выпрямителя, преобразующего переменный ток в постоянный.
2. Амперметр на основе измерительных клещей использует трансформатор с размыкающимся сердечником. Сердечник может быть разомкнут и размещен вокруг проводника. В катушке, расположенной на сердечнике, индуцируется напряжение, которое выпрямляется и подается на прибор магнитоэлектрической системы.
3. При помощи осциллографа можно измерить следующие параметры: частоту сигнала, длительность сигнала, фазовые соотношения между сигналами и амплитуду сигнала, а также наблюдать форму сигнала.
4. Сначала установите ручки управления осциллографом следующим образом: интенсивность, фокусировка, астигматизм и управление положением луча — в среднее положение.



Запуск: внутренний +.

Уровень: авто.

Время/см: 1 мсек.

Вольт/см: 0,02.

Питание: вкл.

Подсоедините пробник (вход) осциллографа к разъему калибратора напряжения. Установите ручками управления четкое, стабильное изображение прямоугольного колебания.

5. Частотомер состоит из генератора меток времени, формирователя входного сигнала, цепи генерации стробирующих импульсов, электронного коммутатора, десятичного счетчика и дисплея.

Генератор меток времени позволяет измерять различные частоты.

Формирователь входного сигнала преобразует входной сигнал в сигнал такой формы и амплитуды, которая совместима с цепями частотомера.

Цепь генерации стробирующих импульсов работает, как центр синхронизации частотомера, она открывает и закрывает электронный коммутатор и обеспечивает сигнал остановки счета в конце счетного периода, а также сброс цепи для следующего счета.

Электронный коммутатор пропускает входной сигнал на счетчик при определенных условиях.

Десятичный счетчик подсчитывает все импульсы, проходящие через электронный коммутатор.

Дисплей обеспечивает визуальный отсчет измеренной частоты.

6. Основной причиной перемещения частотомеров из лабораторий на рабочие места послужило появление интегральных микросхем. Они уменьшили размеры частотомеров.

Глава 14. РЕЗИСТИВНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. В чисто резистивной цепи переменного тока напряжение и ток находятся в фазе.



2. Дано:

$$I_T = 25 \text{ mA} = \\ = 0,025 \text{ A}$$

$$E_T = ?$$

$$R_T = 4,7 \text{ кОм} = \\ = 4700 \text{ Ом.}$$

Решение:

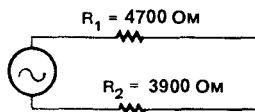
$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{E_T}{4700} = 0,025$$

$$\frac{0,025}{1} \times \frac{E_T}{4700}$$

$$(1)(E_T) = (0,025)(4700)$$

$$E_T = 117,5 \text{ В.}$$

3.



Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$R = ?$$

$$R_1 = 4,7 \text{ кОм} = \\ = 4700 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 3,9 \text{ кОм} = \\ = 3900 \text{ Ом}$$

$$E_1 = ?$$

$$E_2 = ?$$

Решение:

$$R_T = R_1 + R_2$$

$$R_T = 4700 + 3900$$

$$R_T = 8600 \text{ Ом}$$

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{12}{8600}$$

$$I_T = 0,0014 \text{ А или } 1,4 \text{ mA}$$

$$I_T = I_1 = I_2$$

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2}$$

$$0,0014 = \frac{E_1}{4700}$$

$$0,0014 = \frac{E_2}{3900}$$

$$E_1 = 6,58 \text{ В}$$

$$E_2 = 5,46 \text{ В.}$$

4. Дано:

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_1 = 2,2 \text{ кОм} = \\ = 2200 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 5,6 \text{ кОм} = \\ = 5600 \text{ Ом}$$

Решение:

$$E_T = E_1 = E_2$$

$$I_1 = \frac{E_1}{R_1}$$

$$I_1 = \frac{120}{2200}$$

$$I_2 = \frac{E_2}{R_2}$$

$$I_2 = \frac{120}{5600}$$



$$I_1 = ?$$

$$I_1 = 0,055 \text{ А или } 55 \text{ мА}$$

$$I_2 = ?$$

$$I_2 = 0,021 \text{ А или } 21 \text{ мА.}$$

5. Потребляемая цепью переменного тока мощность, точно так же, как и в цепи постоянного тока, определяется рассеиваемой энергией и скоростью, с которой энергия подается в цепь.

6. Дано:

Решение:

$$I_T = ?$$

$$I_T = \frac{E_T}{R_T} = \frac{120}{1200}$$

$$E_T = 120 \text{ В}$$

$$R_T = 1200 \text{ Ом}$$

$$I_T = 0,1 \text{ А или } 100 \text{ мА.}$$

$$P_T = ?$$

$$P_T = I_T E_T = (0,1)(120)$$

$$P_T = 12 \text{ В.}$$

Глава 15. ЕМКОСТНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. В емкостной цепи переменного тока ток опережает по фазе напряжение.

2. Дано:

Решение:

$$X_C = ?$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Гц}$$

$$C = 1000 \text{ мкФ} =$$

$$= 0,001 \text{ Ф}$$

$$X_C = \frac{1}{(2)(3,14)(60)(0,001)}$$

$$X_C = \frac{1}{0,3768} = 2,65 \text{ Ом.}$$

3. Дано:

Решение:

$$I_T = ?$$

$$I_T = \frac{E_T}{X_C} = \frac{12}{2,65}$$

$$E_T = 12 \text{ В}$$

$$X_C = 2,65 \text{ Ом}$$

$$I = 4,53 \text{ А.}$$

4. Емкостные цепи переменного тока могут быть использованы для фильтрации, емкостной связи между цепями и получения фазового сдвига.
5. Емкостные цепочки связи позволяют пропускать высокочастотные компоненты сигнала переменного тока и задерживать низкочастотные.



Глава 16. ИНДУКТИВНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Ток в индуктивной цепи отстает по фазе от приложенного напряжения.
2. Индуктивное сопротивление зависит от индуктивности катушки и частоты приложенного напряжения.

3. Дано:

$$X_L = ?$$

$$\pi = 3,14$$

$$f = 60 \text{ Герц}$$

$$L = 100 \text{ мГн} = \\ = 0,1 \text{ Гн.}$$

Решение:

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (2)(3,14)(60)(0,1)$$

$$X_L = 37,68 \text{ Ом.}$$

4. Дано:

$$I_T = ?$$

$$E_T = 24 \text{ В}$$

$$X_L = 37,68 \text{ Ом.}$$

Решение:

$$I_T = \frac{E_T}{X_L} = \frac{24}{37,68}$$

$$I_T = 0,64 \text{ А или } 640 \text{ мА.}$$

5. Катушки индуктивности используются для фильтрации сигналов и создания фазового сдвига между током и напряжением.
6. Частота, выше или ниже которой индуктивная цепь пропускает или ослабляет сигналы, называется частотой среза.

Глава 17. РЕЗОНАНСНЫЕ ЦЕПИ

1. Найдем емкостное сопротивление.

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{(6,28)(60)(0,000010)}$$

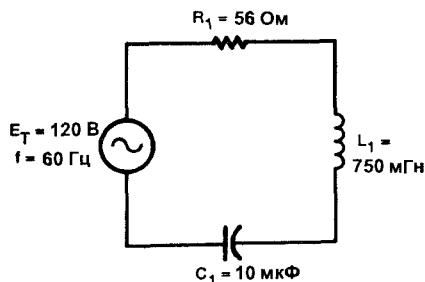
$$X_C = 265,39 \text{ Ом.}$$

Найдем индуктивное сопротивление.

$$X_L = 2\pi fL$$

$$X_L = (6,28)(60)(0,75)$$

$$X_L = 282,60 \text{ Ом.}$$





Теперь найдем:

$$X = X_L - X_C$$

$$X = 282,6 - 265,39$$

$$X = 17,2 \text{ Ом (индуктивное).}$$

Используя X , найдем Z :

$$Z^2 = X^2 + R^2$$

$$Z^2 = (17,21)^2 + (56)^2 = 296,18 + 3136 = 3432,18$$

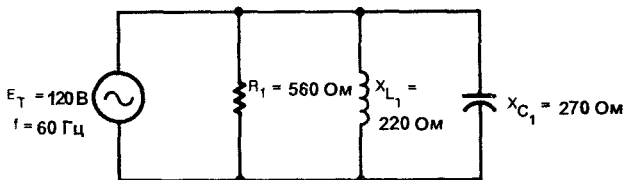
$$Z = \sqrt{3432,18} = 58,58 \text{ Ом.}$$

Найдем общий ток.

$$I_T = \frac{E_T}{Z} = \frac{120}{58,58}$$

$$I_T = 2,05 \text{ А.}$$

2.



Найдем токи в отдельных ветвях.

$$I_R = \frac{E_R}{R}$$

$$I_{X_L} = \frac{E_{X_L}}{X_L}$$

$$I_{X_C} = \frac{E_{X_C}}{X_C}$$

$$I_R = \frac{120}{560}$$

$$I_{X_L} = \frac{120}{220}$$

$$I_{X_C} = \frac{120}{270}$$

$$I_R = 0,214 \text{ А}$$

$$I_{X_L} = 0,545 \text{ А}$$

$$I_{X_C} = 0,444 \text{ А.}$$

Найдем I_X и I_Z , используя I_R , I_{X_L} и I_{X_C} .

$$I_X = I_{X_L} - I_{X_C}$$

$$I_Z^2 = (I_R)^2 - (I_X)^2$$

$$I_X = 0,545 - 0,444$$

$$I_Z^2 = (0,214)^2 - (0,101)^2$$

$$I_X = 0,101 \text{ Ом}$$

$$I_Z^2 = 0,066302$$

(индуктивное)

$$I_Z = \sqrt{0,066302}$$

$$I_Z = 0,257 \text{ А.}$$



Глава 18. ТРАНСФОРМАТОРЫ

1. Когда две электрически изолированные катушки помещены рядом друг с другом, и на одну из них подано переменное напряжение, изменяющееся магнитное поле первой катушки индуцирует напряжение во второй катушке.
2. Мощность трансформатора измеряется в вольт-амперах потому, что является реактивной. Ко вторичной обмотке могут быть подключены различные типы нагрузок и активных, и реактивных. Чисто емкостная нагрузка создаст во вторичной обмотке заметный ток, однако мощность при этом потребляться почти не будет.
3. Если на вторичной обмотке нет нагрузки, то по ней не течет ток. Первичная обмотка работает, как индуктивность в цепи переменного тока. Когда нагрузка подсоединяется ко вторичной обмотке, по ней начинает течь ток. Ток вторичной обмотки создает свое магнитное поле, пересекающее первичную обмотку и индуцирующее в ней напряжение. Это индуцированное поле служит причиной увеличения тока в первичной обмотке¹.

4. Дано:

Решение:

$$\begin{array}{lll}
 N_P = 400 \text{ витков} & E_S = N_S & \text{Коэффициент} \\
 N_S = ? & E_P = N_P & \text{трансформации } n \\
 E_P = 120 \text{ В} & \frac{12}{120} \cancel{\times} \frac{N_S}{400} & n = \frac{N_S}{N_P} = \frac{40}{400} \\
 E_S = 12 \text{ В} & & \\
 & (120)(N_S) = (12)(400) \text{ или } 10:1 \\
 & 1N_S = \frac{(12)(400)}{120} \\
 & N_S = 40 \text{ витков.}
 \end{array}$$

5. Дано:

Решение:

$$\begin{array}{ll}
 N_P = ? & \frac{Z_P}{Z_S} = \left(\frac{N_P}{N_S} \right)^2 \\
 N_S = ? & \\
 Z_P = 16 &
 \end{array}$$

¹ Это утверждение неточно. Процесс саморегулирования происходит не так, и его в двух словах не опишешь (Прим. перев.).



$$Z_s = 4.$$

$$\frac{16}{4} = \left(\frac{N_P}{N_S} \right)^2$$

$$\sqrt{4} = \frac{N_P}{N_S}$$

$$\frac{2}{1} = \frac{N_P}{N_S}$$

Коэффициент
трансформации
равен 2:1.

6. Трансформаторы играют важную роль при передаче электроэнергии, так как уменьшают потери мощности. Величина потерь мощности зависит от сопротивления линии электропередачи и величины тока. Самый простой способ уменьшить потери мощности — это понизить ток путем повышения напряжения с помощью трансформатора.
7. Изолирующий трансформатор предотвращает соединение с землей любого вывода источника напряжения, питающего оборудование.

Глава 19. ОСНОВЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВ

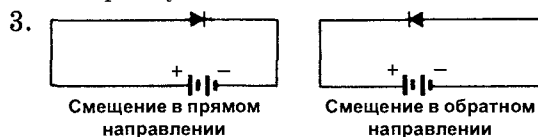
1. Кремний менее чувствителен к нагреву, чем германий, и поэтому чаще используется.
2. Ковалентная связь — это процесс совместного использования электронов атомами. Когда атомы полупроводника совместно используют электроны, их валентные оболочки становятся полностью заполненными, что обеспечивает стабильность.
3. В чистом полупроводниковом материале валентные электроны при низких температурах сильно связаны с атомами и не могут поддерживать ток. При повышении температуры валентные электроны начинают возбуждаться и разрывают ковалентную связь, что позволяет электронам дрейфовать от одного атома к другому. При дальнейшем увеличении температуры материал начинает вести себя как проводник. При очень высоких температурах кремний проводит ток, как обычный проводник.



4. Для того чтобы превратить образец чистого кремния в материал n-типа, кремний легируется атомами, имеющими пять валентных электронов, которые называются пентавалентными материалами, такими как мышьяк и сурьма.
5. Когда к материалу проводника n-типа приложено напряжение, свободные электроны, появившиеся благодаря атомам донора, начнут перемещаться по направлению к положительному выводу. Дополнительные электроны, вырванные из ковалентных связей, также начнут перемещаться по направлению к положительному выводу.

Глава 20. ДИОДЫ НА ОСНОВЕ p-n-ПЕРЕХОДА

1. Диод на основе p-n-перехода позволяет току течь только в одном направлении.
2. Диод проводит ток только тогда, когда он смещен в прямом направлении. Это означает, что положительный вывод источника тока подсоединен к материалу p-типа, а отрицательный вывод источника тока подсоединен к материалу типа n.



Глава 21. СТАБИЛИТРОНЫ

1. В стабилизаторе напряжения на основе стабилитрона последний включен последовательно с резистором, и выходное напряжение снимается со стабилитрона. Стабилитрон противодействует увеличению входного напряжения, поскольку при увеличении тока его сопротивление падает. Изменение входного напряжения проявляется на последовательно включенном резисторе.
2. Для проверки стабилитрона требуются блок питания, токоограничивающий резистор, амперметр и вольтметр. Вольтметр подсоединяется параллельно стабилитрону. Выходное напряжение постепенно увеличивается до тех



пор, пока ток через стабилитрон не станет равным номинальному. После этого ток немного изменяют в обе стороны. Если напряжение на стабилитроне остается постоянным, то стабилитрон работает правильно.

Глава 22. БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

1. Переход эмиттер-база должен быть смещен в прямом направлении, а переход коллектор-база — в обратном.
2. При проверке транзистора с помощью омметра, исправный транзистор должен иметь низкое сопротивление при прямом смещении и высокое сопротивление при обратном смещении каждого перехода.
3. Для определения того, является транзистор германиевым или кремниевым путем измерения падения напряжения на переходе, используется вольтметр, а не омметр. Идентифицировать выводы сложно, так как трудно определить, где эмиттер, а где коллектор.
4. Тип транзистора (р-п-р или п-р-п) определяется напряжением на его коллекторе. Если вместо транзистора р-п-р включить транзистор п-р-п (или наоборот), то он выйдет из строя.
5. Проверка транзистора с помощью прибора для проверки транзисторов предоставляет больше информации о транзисторе, чем его проверка с помощью омметра.

Глава 23. ПОЛЕВЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

1. Напряжение отсечки — это напряжение, при котором исчезает ток стока полевого транзистора.
2. Напряжение отсечки дается производителем транзистора при напряжении затвор-исток равно нулю.
3. Полевой транзистор с изолированным затвором обедненного типа (МОП транзистор) проводит, когда напряжение смещения на затворе равно нулю. Это считается нормальным.
4. МОП транзистор обогащенного типа в нормальном состоянии закрыт, и открывается только при подаче на затвор соответствующего напряжения смещения.



5. При работе с МОП транзисторами должны соблюдаться следующие меры предосторожности:
 - а. До установки его выводы должны быть закорочены.
 - б. Используйте металлический браслет на запястьи для заземления работающей руки.
 - в. Используйте паяльник с заземленным жалом.
 - г. Всегда выключайте питание перед установкой МОП транзистора.

Глава 24. ТИРИСТОРЫ

1. Диод на основе р-п-перехода имеет один переход и два вывода (анод и катод), а КУВ имеет три перехода и три вывода (анод, катод и управляющий переход).
2. Приложенное к аноду напряжение удерживает КУВ во включенном состоянии даже после удаления напряжения с управляющего перехода. Это позволяет току протекать от катода к аноду.
3. Нагрузочный резистор включается последовательно с КУВ для ограничения тока катод-анод.
4. КУВ можно проверить с помощью омметра или промышленного прибора для проверки транзисторов. Для проверки КУВ с помощью омметра подсоедините положительный вывод к катоду, а отрицательный к аноду. Прибор должен показать высокое сопротивление, превышающее 1 МОм. Поменяйте выводы местами: положительный вывод — к аноду, а отрицательный — к катоду. Прибор опять должен показать высокое сопротивление, превышающее 1 МОм. Соедините управляющий электрод с анодом — сопротивление должно упасть до величины меньшей 1000 Ом. Удалите соединение управляющего электрода с анодом — сопротивление должно остаться низким. Отсоедините выводы и повторите проверку.
5. Диак используется как устройство запуска триака. Он предотвращает включение триака до тех пор, пока на управляющем электроде не будет достигнуто некоторое напряжение.



Глава 25. ИНТЕГРАЛЬНЫЕ МИКРОСХЕМЫ

1. Гибридные интегральные микросхемы содержат монолитные, тонкопленочные, толстопленочные и дискретные компоненты.
2. Чип — это полупроводниковый материал, содержащий интегральную микросхему и имеющий площадь около одного квадратного сантиметра.
3. Резисторы и конденсаторы в интегральной микросхеме не формируются монолитным методом, поскольку требуется достаточно высокая точность соблюдения величины их параметров. Монолитный метод не позволяет получить такую же точность, какую дает тонкопленочная и толстопленочная техника.

Глава 26. ОПТОЭЛЕКТРОННЫЕ УСТРОЙСТВА

1. Самое короткое время отклика на изменения интенсивности света из всех фоточувствительных устройств имеет фотодиод.
2. Фототранзистор имеет более широкую область применений, поскольку у него более высокое усиление. Однако, его время отклика на изменения интенсивности света больше, чем у фотодиода.
3. Чем больше ток, протекающий через светодиод, тем ярче испускаемый им свет. Однако последовательно со светодиодом должен быть включен резистор, ограничивающий ток, для избежания повреждения светодиода.

Глава 27. ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ

1. Выбирая трансформатор для блока питания, следует учитывать мощность первичной обмотки, частоту, на которой он будет работать, напряжение и ток вторичной обмотки и общую расчетную мощность трансформатора.
2. Трансформаторы используются для изоляции блока питания от сети переменного тока.
3. Выпрямитель в блоке питания преобразует входное напряжение переменного тока в постоянное.



4. Недостатком двухполупериодного выпрямителя является то, что для него необходим трансформатор с отводом от центра вторичной обмотки. Преимущество в том, что для него требуются только два диода. Преимущество мостового выпрямителя в том, что для него не требуется трансформатор; однако для него требуются четыре диода. Оба выпрямителя являются более эффективными, чем однополупериодный, и их напряжение легче фильтруется.
5. Фильтрующий конденсатор заряжается, когда ток течет и разряжается, когда ток перестает течь, удерживая выходной ток постоянным.
6. Конденсаторы, выбранные для фильтрации, должны обеспечивать большую постоянную времени RC . Медленный разряд поддерживает высокое напряжение на выходе.
7. Стабилизатор последовательного типа компенсирует повышение входного напряжения путем увеличения последовательного сопротивления и, следовательно, падения напряжения на нем, так что выходное напряжение остается постоянным.
8. При выборе микросхемы стабилизатора напряжения необходимо знать выходное напряжение и ток нагрузки.
9. Умножители напряжения позволяют повышать напряжение без использования трансформатора.
10. Напряжение, полученное на входе двухполупериодного удвоителя, легче фильтруется, чем напряжение от однополупериодного удвоителя напряжения. Кроме того, на конденсаторы в двухполупериодном удвоителе подается только пиковое значение входного сигнала.
11. Для защиты цепи от превышения напряжения используется цепь с КУВ, включенным параллельно нагрузке.
12. Для защиты от превышения тока используются плавкие предохранители и размыкатели цепи.

Глава 28. УСИЛИТЕЛИ

1. Транзистор обеспечивает усиление посредством использования входного сигнала для управления током, текущим



через транзистор и управляющий напряжением на нагрузке.

2. Схема с общим эмиттером обеспечивает усиление и по току, и по напряжению и дает высокий коэффициент усиления по мощности. Ни одна из других схем не обеспечивает этой комбинации.
3. Изменения температуры влияют на коэффициент усиления транзистора. Отрицательная обратная связь компенсирует это.
4. Усилители класса А смещены таким образом, что выходной ток течет через них в течение всего периода. Усилители класса В смещены таким образом, что выходной ток течет в течение только половины периода входного сигнала. Усилители класса АВ смещены таким образом, что выходной ток течет в течение промежутка большего, чем половина периода входного сигнала, но меньшего, чем период. Усилители класса С смещены таким образом, что выходной ток течет в течение промежутка меньшего половины периода входного сигнала.
5. При соединении двух транзисторных усилителей необходимо предотвратить влияние напряжения смещения одного усилителя на работу второго.
6. Если для связи используются конденсаторы или катушки индуктивности, реактивное сопротивление элемента связи будет влиять на диапазон передаваемых частот.
7. Усилители постоянного тока или с гальванической связью используются для усиления сигналов от 0 Гц (постоянный ток) до многих тысяч герц.
8. Температурная стабильность усилителей постоянного тока достигается путем использования дифференциального усилителя.
9. Усилители напряжения звуковой частоты обеспечивают высокое усиление по напряжению, тогда как усилители мощности звуковой частоты обеспечивают высокое усиление по мощности.



10. Для комплементарного двухтактного усилителя требуются подобранные р-п-р и п-р-п транзисторы. Квази-комплементарный усилитель не требует подбора транзисторов.
11. Видеоусилитель имеет более широкий диапазон частот, чем усилитель звуковой частоты.
12. Фактором, ограничивающим усиление видеоусилителя на высоких частотах, является шунтирующая емкость цепи.
13. Усилитель радиочастоты усиливает сигналы в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц.
14. Усилитель промежуточной частоты — это одночастотный (узкополосный) усилитель, используемый для усиления сигнала до необходимого уровня.
15. Операционный усилитель состоит из входного каскада (дифференциальный усилитель), усилителя напряжения с высоким коэффициентом усиления и выходного усилителя. Это усилитель постоянного тока с высоким коэффициентом усиления, способный усиливать входной сигнал в 20 000–1 000 000 раз.
16. Операционные усилители используются для сравнения, инвертирования и неинвертирования сигнала, а также для суммирования, кроме того они применяются в качестве активных фильтров и разностных усилителей.

Глава 29. ГЕНЕРАТОРЫ

1. Генератор состоит из частотозадающей цепи, называемой колебательным контуром, усилителя, усиливающего сигнал колебательного контура и цепи обратной связи, подающей часть выходного сигнала обратно в колебательный контур для поддержания колебаний.
2. Колебания в колебательном контуре можно поддерживать при помощи положительной обратной связи, т.е. подачи части выходного сигнала, совпадающего по фазе, обратно на вход для возмещения потерь энергии, обусловленных сопротивлением компонентов колебательного контура.



3. Главными типами генераторов синусоидальных колебаний являются: генератор Хартли, генератор Колпитца и генератор Клаппа.
4. Кварцы имеют собственную частоту колебаний и идеально подходят для цепей генераторов. Частота кварца используется для управления частотой колебательного контура.
5. Генераторы несинусоидальных колебаний генерируют сигналы несинусоидальной формы. Обычно все генераторы несинусоидальных колебаний являются разновидностями релаксационного генератора.
6. В генераторах несинусоидальных колебаний используются блокинг-генераторы, мультивибраторы, RC цепи и интегральные микросхемы.

Глава 30. ЦЕПИ ФОРМИРОВАНИЯ СИГНАЛА

1. Частотный анализ основывается на утверждении, что все периодические сигналы состоят из синусоид. Периодическое колебание может быть получено путем сложения многих синусоид, имеющих различные амплитуды, фазы и частоты.
2. Положительный выброс, отрицательный выброс и «звон» имеют место вследствие несовершенства цепей.
3. Дифференцирующая цепь используется для получения узких импульсов из прямоугольных в цепях синхронизации. Интегрирующая цепь используется в цепях формирования сигналов.
4. Уровень постоянной составляющей сигнала может быть изменен с помощью цепи фиксации посредством сложения сигнала с заданным уровнем постоянного напряжения.
5. Моностабильная цепь имеет только одно стабильное состояние и отвечает одним выходным импульсом на каждый входной. Бистабильная цепь имеет два стабильных состояния и требует двух входных импульсов для управления.



6. Триггер может генерировать прямоугольные колебания для использования в качестве стробирующих или синхронизирующих сигналов, или для операций переключения.

Глава 31. ДВОИЧНАЯ СИСТЕМА СЧИСЛЕНИЯ

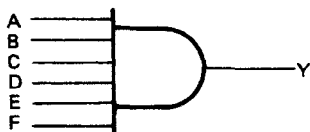
1.

Деся- тичное	Двоич- ное	Деся- тичное	Двоич- ное	Деся- тичное	Двоич- ное	Деся- тичное	Двоич- ное
0	00000	7	00111	14	01110	21	10101
1	00001	8	01000	15	01111	22	10110
2	00010	9	01001	16	10000	23	10111
3	00011	10	01010	17	10001	24	11000
4	00100	11	01011	18	10010	25	11001
5	00101	12	01100	19	10011	26	11010
6	00110	13	01101	20	10100	27	11011

2. Для представления десятичного числа 100 требуется семь двоичных разрядов (1100100).
3. Для преобразования десятичного числа в двоичное необходимо последовательно делить десятичное число на 2, записывая остаток после каждого деления. Остатки, взятые в обратном порядке, образуют двоичное число.
4. а. $100101,001011 = 37,171875$.
 б. $111101110,11101110 = 494,9296875$.
 в. $10000001,00000101 = 129,0195312$.
5. Преобразовать каждую десятичную цифру в двоичную, используя двоично-десятичный код.
6. а. $0100\ 0001\ 0000\ 0110 = 4106$.
 б. $1001\ 0010\ 0100\ 0011 = 9243$.
 в. $0101\ 0110\ 0111\ 1000 = 5678$.

Глава 32. ОСНОВНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

1.

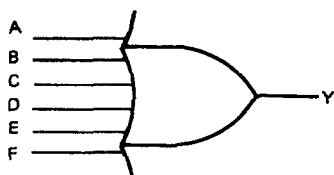




2.

A	B	C	D	Y
0	0	0	0	0
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	1	0	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	0
1	1	1	0	0
0	0	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	0	1	1	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	1

3.

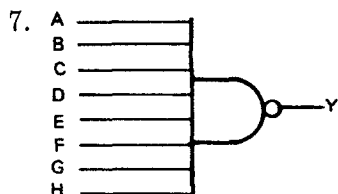


4.

A	B	C	D	Y
0	0	0	0	0
1	0	0	0	1
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1
0	0	1	0	1
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	0	1
0	0	0	1	1
1	0	0	1	1
0	1	0	1	1
1	1	0	1	1
0	0	1	1	1
1	0	1	1	1
0	1	1	1	1
1	1	1	1	1

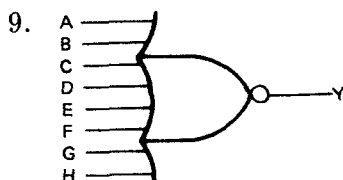


5. Цепь НЕ используется для выполнения инверсии или дополнения.
6. Кружочек изображается на входе для инверсии входного сигнала и размещается на выходе для инверсии выходного сигнала.



8.

A	B	C	D	Y
0	0	0	0	1
1	0	0	0	1
0	1	0	0	1
1	1	0	0	1
0	0	1	0	1
1	0	1	0	1
0	1	1	0	1
1	1	1	0	1
0	0	0	1	1
1	0	0	1	1
0	1	0	1	1
1	1	0	1	1
0	0	1	1	1
1	0	1	1	1
0	1	1	1	1
1	1	1	1	0





10.

A	B	C	D	Y
0	0	0	0	1
1	0	0	0	0
0	1	0	0	0
1	1	0	0	0
0	0	1	0	0
1	0	1	0	0
0	1	1	0	0
1	1	1	0	0
0	0	0	1	0
1	0	0	1	0
0	1	0	1	0
1	1	0	1	0
0	0	1	1	0
1	0	1	1	0
0	1	1	1	0
1	1	1	1	0

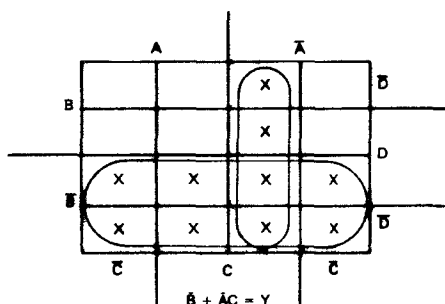
11. Элемент «исключающее ИЛИ» дает высокий уровень на выходе только тогда, когда уровни входов различны. Если на входах два нуля или две единицы, то на выходе ноль.
12. Элемент «исключающее НЕ-ИЛИ» имеет максимум два входа.

Глава 33. ПРОСТЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

1. Процедура использования диаграмм Вейча следующая:
- Нарисуйте диаграмму, соответствующую числу переменных.
 - Нанесите на нее логические функции, отмечая их знаком X в соответствующем квадрате.
 - Для получения упрощенной логической функции объедините соседние квадраты, помеченные знаком X, в группы по восемь, четыре или два. Продолжайте объединять до тех пор, пока не будут объединены все квадраты, помеченные знаком X.
 - Логически сложите слагаемые (объедините с помощью операции ИЛИ) от каждой петли, одно слагаемое на каждую петлю.
 - Запишите упрощенное выражение.



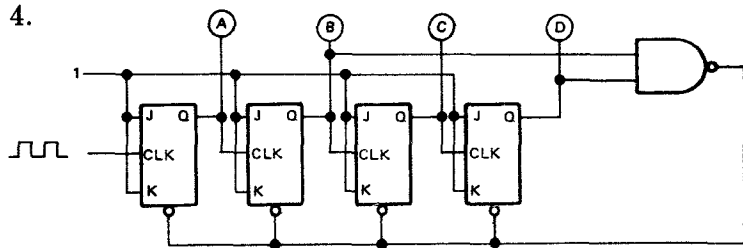
2.



Глава 34. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ ЦЕПИ

1. Для изменения состояния выхода RS-триггера необходимо подать высокий уровень сигнала или 1 на вход R. Это изменит состояние триггера на 0 на выходе Q и на 1 на выходе $\bar{Q}$.
2. Главное отличие D-триггера от тактируемого RS-триггера состоит в том, что D-триггер имеет один вход для данных и вход для тактовых импульсов.
3. Счетчик состоит из триггеров, соединенных либо для асинхронного, либо для синхронного режима счета. В режиме асинхронного счета выход Q первого каскада соединен с тактовым входом следующего каскада. В режиме синхронного счета входы тактовых импульсов всех каскадов соединены параллельно.

4.



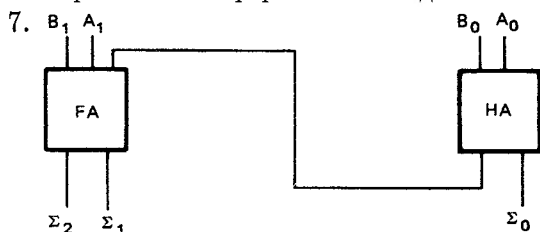
5. Сдвиговый регистр рассчитан для временного хранения данных. Данные могут быть загружены в сдвиговый регистр или последовательно, или параллельно.
6. Сдвиговые регистры могут использоваться для хранения данных, для преобразования данных из последовательной



формы в параллельную и наоборот, и для выполнения таких арифметических действий, как деление и умножение.

Глава 35. КОМБИНАЦИОННЫЕ ЛОГИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

1. Шифраторы позволяют декодировать сигналы от клавиатуры в двоичные числа.
2. Для ввода данных с клавиатуры требуется десятично-двоичный шифратор с приоритетом.
3. Дешифраторы позволяют преобразовывать сложные двоичные коды в распознаваемые цифры или символы.
4. Дешифраторы бывают следующих типов: дешифраторы 1 на 10, дешифраторы 1 на 8, дешифраторы 1 на 16 и дешифраторы двоично-десятичного кода в код семисегментного индикатора.
5. Мультиплексоры позволяют выбирать и направлять сигналы от отдельных источников на один выход.
6. Мультиплексоры могут использоваться для выбора линии передачи данных и для преобразования данных из параллельной формы в последовательную.



8. Полный сумматор получает два двоичных числа для сложения и выдает сумму и перенос. Перенос подается на следующий каскад и складывается с двумя двоичными числами, выдавая сумму и перенос. Ответ является результатом переноса и двух сумм.

Глава 36. ОСНОВЫ МИКРОКОМПЬЮТЕРОВ

1. Компьютер состоит из блока управления, арифметико-логического устройства (АЛУ), памяти и блока ввода/вывода. Блок управления дешифрует команды, поступаю-



щие в компьютер и выдает импульсы, необходимые для выполнения указанных функций. АЛУ выполняет операции, связанные с математической логикой и принятием решений. Память — это место, где хранятся программы и данные. Блок ввода и вывода позволяет вводить в компьютер и удалять их из него.

2. Прерывание — это сигнал от внешнего устройства, сообщающий компьютеру о необходимости принять или послать данные.
3. Микропроцессор — это часть микрокомпьютера. Он состоит из блока управления и арифметико-логического устройства.
4. Микропроцессор выполняет функции управления и операции, связанные с математической логикой и принятием решений.

Серия «Учебники и учебные пособия»

Эрл Д.Гейтс

Введение в электронику

Редактор:	<i>Дмитриев В.</i>
Корректоры:	<i>Диденко Н.</i> <i>Дьякова Л.</i>
Художник:	<i>Федосеева А.</i>
Компьютерный дизайн:	<i>Петров А.</i>

Лицензия ЛР № 065194 от 2 июня 1997 г.

Сдано в набор 06.12.97. Подписано в печать 19.01.98.

Формат 84×108¹/₃₂. Бумага газетная.

Гарнитура Школьная. Печать офсетная.

Тираж 5000. Заказ № 61.

Издательство «Феникс»

344007, г Ростов-на-Дону, пер. Соборный, 17

Отпечатано с готовых фотоформ

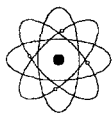
в АП «Днепропетровская книжная типография»,

320036, г. Днепропетровск, ул. Горького, 20



*Приглашаем
к сотрудничеству авторов*

**НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЙ
И НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
В ОБЛАСТИ:**



**– СОЦИАЛЬНЫХ
И ЕСТЕСТВЕННЫХ НАУК**



– ЮРИСПРУДЕНЦИИ



– МЕДИЦИНЫ



**– ПРОГРАММИРОВАНИЯ
И ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ
ТЕХНИКИ**

*Все финансовые затраты берем на СЕБЯ, высокие
гонорары выплачиваем согласно договору*

Рукописи не рецензируются и не возвращаются

**Наш адрес:
344007, г. Ростов-на-Дону,
пер. Соборный, 17
Тел.: (8632) 62-51-94**